DIRECCION DE OPERACIONES

Aspectos tácticos y operativos en la producción y los servicios

DIRECCION DE OPERACIONES

Aspectos tácticos y operativos en la producción y los servicios

JOSE ANTONIO DOMINGUEZ MACHUCA
Universidad de Sevilla

SANTIAGO GARCIA GONZALEZ
Universidad de Huelva

MIGUEL ANGEL DOMINGUEZ MACHUCA
Universidad de Sevilla

ANTONIO RUIZ JIMENEZ
Universidad de Sevilla

MARIA JOSE ALVAREZ GIL
Universidad Carlos III de Madrid

McGraw-Hill

MADRID • BUENOS AIRES • CARACAS • GUATEMALA • LISBOA • MEXICO
NUEVA YORK • PANAMA • SAN JUAN • SANTAFE DE BOGOTA • SANTIAGO • SAO PAULO
AUCKLAND • HAMBURGO • LONDRES • MILAN • MONTREAL • NUEVA DELHI • PARIS
SAN FRANCISCO • SIDNEY • SINGAPUR • ST. LOUIS • TOKIO • TORONTO

DIRECCION DE OPERACIONES. Aspectos tácticos y operativos en la producción y los servicios

Edificio Valrealty, 1.ª planta
Basauri, 17
28023 Aravaca (Madrid)

ISBN: 84-481-1803-0
Depósito legal: M. 14.718-2003

Editor: Mariano J. Norte
Diseño cubierta: Estudio Félix Piñuela
Compuesto en MonoComp, S. A.
Impreso en Lavel, S. A. Industria Gráfica

IMPRESO EN ESPAÑA - PRINTED IN SPAIN

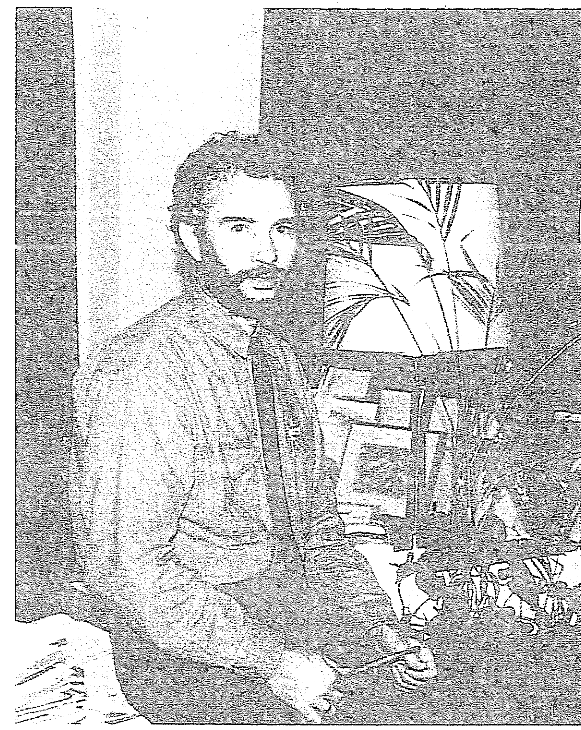
«Hoy no puedo, mañana tampoco, quizá cuando termine el libro...»
... A aquellas y aquellos que, durante tanto tiempo, han soportado nuestra dedicación a esta obra.

CONTENIDO

PARTE SEGUNDA
LA CALIDAD: SU GESTION Y CONTROL

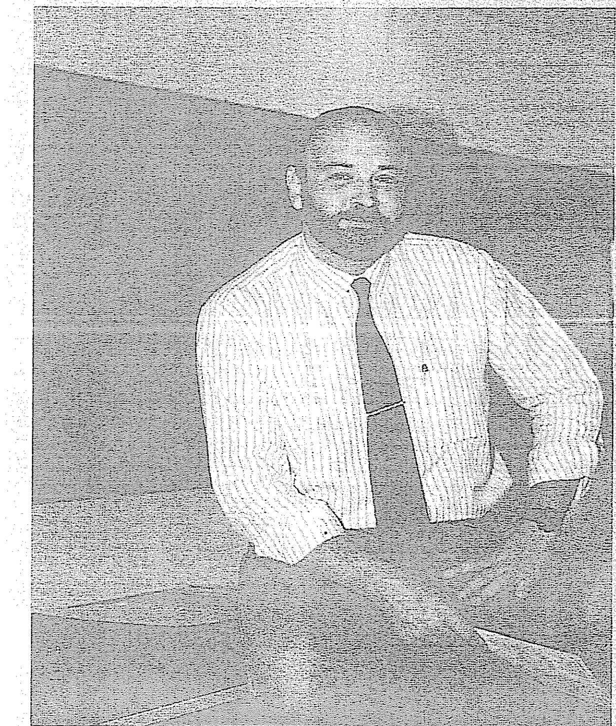
PARTE TERCERA
LA GESTION DE STOCKS DE PRODUCTOS TERMINADOS

SOBRE LOS AUTORES



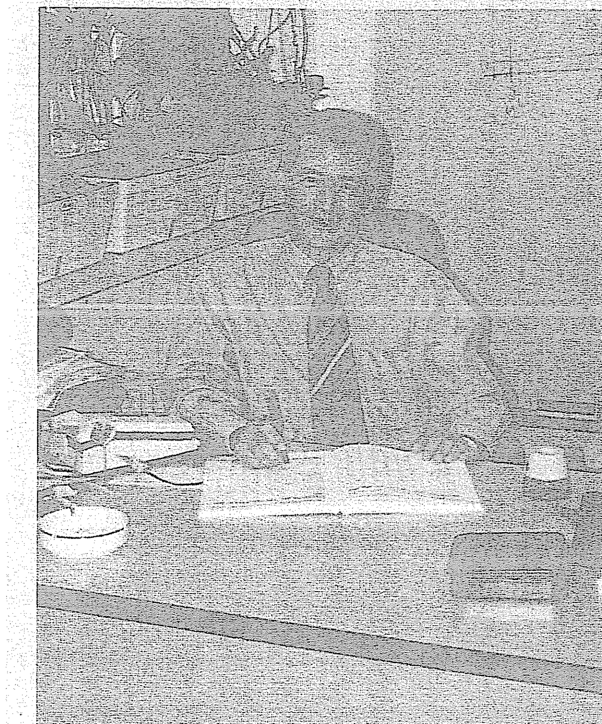
José Antonio Domínguez Machuca

- Doctor Ingeniero Industrial y Licenciado en Ciencias Económicas y Empresariales (Sección Empresariales).
- Catedrático de Economía de la Empresa en la Universidad de Sevilla, donde ha enseñado en las áreas de Operaciones, Finanzas y Simulación Empresarial con Dinámica de Sistemas.
- Profesor e investigador visitante en numerosas universidades extranjeras (M. I. T., Berkeley y San Diego (EE.UU.), Bocconi y Politécnico de Milano (Italia), Dauphine y Lyon II (Francia), Centro de Buenos Aires (Argentina), C. I. D. E. (México), Asian Institute of Technology (Thailandia), Shangai Institute of Technology (China), Gakushuin (Japón), entre otras.)
- Director del Departamento de Economía Financiera y Dirección de Operaciones (1983-1993) y Vicedecano de la Facultad de Ciencias Económicas y Empresariales de la Universidad de Sevilla (1983-1989).
- Vicepresidente de la System Dynamics Society (1990-1992 y 1994-1997), Consejero o/y miembro de otras sociedades científicas internacionales y nacionales (WACRA, TIMS, ORSA, POMS, SAGSET, ABSEL, AEDEM, ACEDE, SESGE).
- Director del Grupo de Investigación en Dirección de Empresas Asistidas por Ordenador (G. I. D. E. A. O). Ha dirigido numerosos proyectos de investigación empresarial, tanto a nivel nacional como de ámbito europeo, con financiación pública y/o privada. Asimismo ha realizado trabajos de consultoría y de formación para distintas firmas nacionales y multinacionales.
- Es autor/coautor de otros siete libros y editor/coeditor de cuatro monografías (tres internacionales), así como de más de cuatro decenas de artículos en revistas y obras colectivas de su especialidad (internacionales y nacionales).
- Miembro del Comité de Programa Científico en seis congresos internacionales (tres veces como Presidente) y ponente en más de treinta, así como en unos veinte nacionales. Ha presidido sesiones en múltiples ocasiones.



Santiago García González

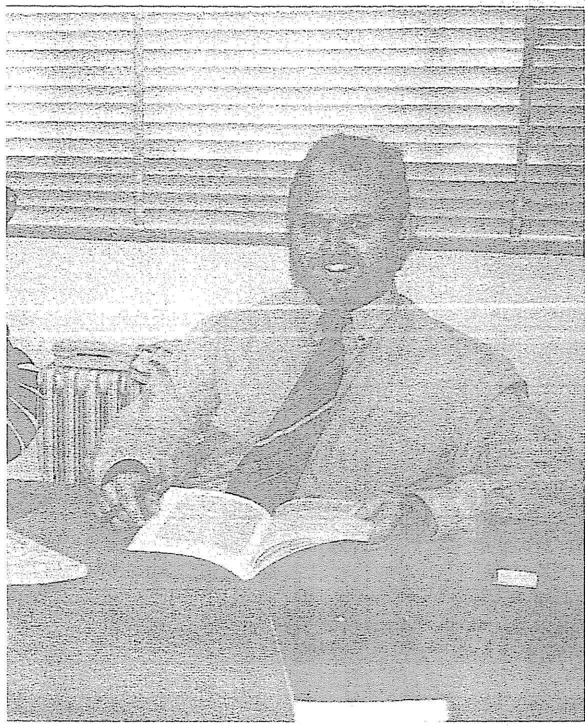
- Doctor en Ciencias Económicas y Empresariales (Sección Empresariales).
- Catedrático de Economía Financiera y Contabilidad de la Universidad de Huelva, en la que actualmente imparte docencia en el área de Dirección de Operaciones, habiéndolo hecho con anterioridad en esta disciplina, así como en las de Informática y Economía de la Empresa en la Universidad de Sevilla.
- Director del Departamento de Economía Financiera, Contabilidad y Dirección de Operaciones de la Universidad de Huelva desde su creación. Secretario de la Escuela Universitaria de Estudios Empresariales de la Universidad de Sevilla (1987-1989).
- Miembro de diversas sociedades científicas (System Dynamics Society, AEDEM, ACEDE).
- Miembro del Grupo de Investigación en Dirección de Empresas Asistidas por Ordenador (G. I. D. E. A. O.). Ha participado en diversos proyectos de investigación empresarial con financiación pública y/o privada y ha realizado trabajos de consultoría y formación para distintas empresas nacionales.
- Es autor/coautor de otros dos libros y de más de una quincena de artículos en revistas y obras colectivas de su especialidad. Ha presentado trabajos en diversos congresos nacionales e internacionales.
- Ha organizado, coordinado, dirigido o impartido diferentes cursos, seminarios y ciclos de conferencias dirigidos a profesionales y posgraduados.



Miguel Angel Domínguez Machuca

- Doctor Ingeniero Industrial.
- Catedrático de Economía Financiera en la Universidad de Sevilla, donde ha impartido docencia en Economía de la Empresa, Productos y Procesos Industriales, Marketing y, desde hace diez años, exclusivamente Dirección de Operaciones y Simulación Empresarial con Dinámica de Sistemas.
- Profesor invitado por el Politécnico de Milano (Italia) e Investigador en la Universidad de Lyon II (Francia).
- Secretario del Departamento de Economía Financiera y Dirección de Operaciones de la Universidad de Sevilla (1985-1992).
- Miembro del Grupo de Investigación en Dirección de Empresas Asistidas por Ordenador (G. I. D. E. A. O.). Ha participado en diversos proyectos de investigación y ha realizado trabajos de consultoría para la Administración Pública y distintas empresas privadas, así como de formación para distintas firmas nacionales e internacionales.
- Es coautor de otros tres libros, así como de diversos artículos en revistas y obras colectivas de su especialidad. Ha presentado trabajos en diversos congresos nacionales e internacionales.
- Miembro de diversas sociedades científicas (System Dynamics Society, AEDEM, ACEDE).
- Asesor técnico en Dirección de Operaciones y miembro del Talent Pool del Centro Europeo de Empresas e Innovación (EUROCEI) desde diciembre de 1995.
- Coordinador del Talent Pool del Centro Europeo de Empresas e Innovación (EUROCEI) desde junio de 1996.

Antonio Ruiz Jiménez



- Doctor en Ciencias Económicas y Empresariales (Sección Empresariales).
- Profesor Titular de Economía Financiera y Contabilidad en la Universidad de Sevilla, donde imparte docencia en el Area de Dirección de Operaciones y de Simulación Empresarial con Dinámica de Sistemas.
- Secretario de la Comisión de Doctorado del Departamento de Economía Financiera y Dirección de Operaciones de la Universidad de Sevilla (1989-1993).
- Miembro del Grupo de Investigación en Dirección de Empresas Asistidas por Ordenador (G. I. D. E. A. O.). Ha participado en diversos proyectos de investigación, a nivel nacional e internacional, con financiación pública y/o privada.
- Ha organizado e impartido distintos seminarios y ciclos de conferencias dirigidos a profesionales y alumnos de posgrado, algunos de ellos de carácter internacional.
- Es coautor de otros dos libros y autor/coautor de numerosos artículos y publicaciones en revistas y obras colectivas relacionados con la Dirección de Operaciones y la Dinámica de Sistemas.
- Ha presentado trabajos en cuatro congresos internacionales y seis nacionales.
- Ha realizado trabajos para la Administración Pública (1986-1987), así como diversas tareas de consultoría y formación.
- Miembro de diversas sociedades científicas (System Dynamics Society, AEDEM, ACEDE).

María José Alvarez Gil



- Doctora en Ciencias Económicas y Empresariales (Sección Empresariales).
- Profesora Titular de Economía Financiera y Contabilidad del Departamento de Economía de la Empresa en la Universidad Carlos III de Madrid, donde ha impartido docencia en las áreas de Finanzas y Operaciones (actualmente sólo en esta última) en el Segundo y Tercer Ciclos; anteriormente lo hizo en la Universidad de Sevilla. Ha dictado conferencias en los programas de Tercer Ciclo de las Universidades de Almería, Cádiz, León y Sevilla.
- Secretaria de la Diplomatura en Ciencias Empresariales de la Universidad Carlos III de Madrid (1992 hasta la fecha).
- Miembro de la Asociación europea OMA (*Operations Management Association*), European Working Group on Financial Modelling, AEDEM, y de la norteamericana POMS (*Production and Operations Management Society*).
- Ha participado en más de siete proyectos de investigación nacionales y europeos, los cuales recibieron financiación pública, así como trabajos de asesoramiento y formación para entidades públicas y privadas.
- Es coautora de otro libro y ha participado en cuatro obras colectivas internacionales y otras seis nacionales. Ha publicado una decena de artículos en diferentes revistas especializadas nacionales e internacionales.
- Ha presentado ponencias en seis congresos y dos *workshops* internacionales y cerca de una decena en los nacionales, actuando en diferentes ocasiones como moderadora y *discussant*.

PROLOGO

Tradicionalmente se ha venido contemplando la Dirección y Gestión de la Producción (hoy Dirección de Operaciones), bien desde un punto de vista muy técnico, o bien, especialmente a nivel académico, con un enfoque optimizador dominado por la Investigación Operativa. Solía imperar un enfoque analítico que desgraciadamente aún se encuentra con demasiada frecuencia e, incluso, una insuficiente consideración de sistema abierto para el área productiva, a la cual, por otra parte, la Dirección no dedicaba especial interés. Si bien estos planteamientos pudieron mantenerse en una cierta etapa histórica, hace ya bastantes años que dicha concepción es insostenible, siendo necesario un cambio radical de orientación. Son numerosos los temas y las técnicas que fueron consideradas esenciales y que hoy han pasado, o deben pasar, a un discreto segundo plano. Por otra parte, es necesario resaltar que aunque los métodos e instrumentos puedan ser importantes para mejorar la Dirección de Operaciones, éstos son un medio y no un fin en sí mismos.

Durante los años sesenta y setenta la mayor parte de las empresas occidentales habían asumido un sistema productivo problemático en el que se mantenía un nivel aceptable de calidad (o más bien de mala calidad), existía una falta de cooperación por parte de la fuerza de trabajo, faltaba una adecuada planificación y programación de operaciones, la producción se terminaba con retraso, etc. El personal de inspección y coordinación creció hasta la saciedad, llegando a la propoción de tres o cuatro personas de *staff* por una productiva. En dicho contexto era necesario trabajar con un enorme volumen de inventarios que intentaba paliar los problemas mencionados, así como dedicar una gran cantidad de tiempo a la aceleración de las órdenes de trabajo retrasadas. A nivel académico la tónica ha venido siendo análoga y, como temas capitales, aparecían la gestión de aquellos inventarios que parecían indispensables o los métodos de optimización, con restricciones asumidas como inevitables. No es extraño, pues, que la Función de Operaciones despertase tan poco interés entre los directivos y entre los profesores y estudiantes de Dirección de Empresas que, por otra parte, en nuestro país (salvo muy contadas excepciones) no tenían dicha materia en su Plan de Estudios.

Por desgracia, hizo falta una fuerte sacudida a nivel mundial para que al fin despertaran de su letargo las empresas occidentales y se produjese un cambio radical en el estado de opinión sobre la Función de Operaciones. El revulsivo vino de la mano de la creciente e imparable internacionalización de la Economía, la cual ha llevado a un nivel de competencia desconocido en el pasado. En dicho contexto, uno de los factores cruciales lo constituyó la penetración japonesa en los mercados occidentales, que invadió áreas tradicionalmente dominadas por las empresas americanas y europeas. La erosión provocada por la creciente compe-

tencia internacional tuvo efectos muy importantes sobre el desempleo y la Balanza Comercial, provocando una atención preferente en los gobiernos de los países afectados. El factor básico para el triunfo en la batalla competitiva, por parte de las firmas japonesas, fue la inversión en dirección y gestión: mejora de los sistemas productivos, nuevos métodos de dirección, planificación y control de operaciones, trabajo en equipo, gestión integrada y especial atención al factor humano fueron las armas fundamentales.

Resulta evidente, pues, la tremenda importancia que tiene para el mundo empresarial el adecuado conocimiento y tratamiento de la Función de Operaciones, así como las posibilidades de una sólida formación en dicha disciplina. Bajo la presión de la competencia internacional, el desfase existente entre dichas necesidades y la realidad va reduciéndose considerablemente en muchos países; sin embargo, en el nuestro existe aún un notable retraso, mayor si cabe en el mundo académico (especialmente en las FCEE y EUEE) que en el profesional. Debido a ello nos planteamos la elaboración de la presente obra, subdividida en dos libros y dirigida a los dos ámbitos mencionados, que recoge la experiencia de los autores tras veinte años de docencia, investigación y aplicaciones en este campo[1]. Su contenido surge de ésta y pretende reflejar los temas que resultan fundamentales para la actualidad y para un próximo futuro. En el desarrollo de los mismos, en el que hemos intentado combinar la necesaria profundidad con un nivel pedagógico adecuado, hemos tenido en cuenta una serie de condiciones básicas que, a nuestro juicio, deben estar presentes en cualquier obra sobre Dirección de Operaciones que desee ser fiel a la compleja problemática a que ésta se enfrenta en nuestros días. Estas son:

- Desarrollar la disciplina de forma integrada, con un enfoque jerárquico, de forma que las decisiones de los niveles estratégico, táctico y operativo estén claramente relacionadas y coordinadas. Es frecuente observar que esto no ocurre en muchos libros de texto, donde, a menudo, aquéllas se exponen como elementos aparentemente inconexos y, muchas veces, desordenadas e incompletas. Esto dificulta la visión global y, con ello, la clara percepción de la compleja problemática de la Dirección de Operaciones.
- Buscar un equilibrio adecuado entre los aspectos ligados con el largo plazo (nivel estratégico) y aquellos otros relacionados con el medio y corto plazo (niveles táctico y operativo).
- Dejar claras las interrelaciones con otras funciones empresariales, haciendo ver cómo, en los distintos niveles decisionales, es necesario tener en cuenta la influencia recíproca. Se huye así de la estrecha visión analítica que lleva, en el mejor de los casos, a la suboptimización.
- Considerar la creciente relevancia de los servicios, haciendo referencias explícitas a los mismos cuando sus diferencias con las empresas de fabricación lo hagan necesario.
- Buscar un equilibrio en el contenido de los temas, de forma que todos ellos queden suficientemente cubiertos y que se tenga en cuenta su importancia, actual y futura, para la empresa.
- Colocar a los métodos y técnicas en su lugar, dejando claro que son un medio y no un fin en la Dirección de Operaciones, así como sus limitaciones, ventajas e inconvenientes.

[1] Esta obra puede complementarse con el libro «El subsistema productivo de la empresa», dedicado a problemas y ejercicios (de J. A. D. Machuca, S. Durbán y E. Martín (Pirámide, 1990)).

En la primera parte de esta obra, dedicada al estudio de los aspectos estratégicos[2] abordamos la determinación de la Estrategia de Operaciones, incluyendo los objetivos y el diseño del subsistema. Este se caracteriza por un conjunto de decisiones estructurales interrelacionadas, tales como qué productos o servicios van a elaborarse y mediante qué procesos; cuál va a ser la capacidad a largo plazo y los equipos necesarios para conseguirla, así como la localización de la actividad productiva y la distribución en planta del equipo y del factor humano. Con ello hemos fijado, pues, el marco de referencia que nos indica dónde queremos llegar, cómo y con qué medios. A partir de dicho marco, se hace necesario ahora, para el medio y corto plazo:

- Concretar los objetivos.
- Concretar, respecto a los productos o servicios a elaborar, las correspondientes cantidades y momentos de tiempo que permitan alcanzar dichas metas (planificación).
- Determinar qué componentes hay que elaborar o adquirir y en qué momentos, para conseguir satisfacer lo establecido para los productos (programación).
- Ver qué actividades deberán desarrollarse en las distintas unidades productivas, y en qué momentos, con objeto de cumplir los requerimientos de componentes (programación a muy corto plazo).
- Tener en cuenta, en todos los niveles, los recursos disponibles, es decir, considerar la problemática de la capacidad de forma que se elaboren planes y programas factibles.
- Considerar las necesidades de materiales, tanto de productos terminados para los clientes como de materias primas y componentes intermedios para fabricación, de acuerdo con la planificación y programación elaborada (planificación, gestión y control de inventarios).

En definitiva, en lo que se refiere a la Función de Operaciones, se trata de proyectar el futuro deseado, los medios necesarios y las actividades a desarrollar para conseguirlo, clásico concepto de planificación con el que coinciden en esencia numerosos autores. Hecho esto podrá pasarse a la fase de ejecución y llevar a cabo los controles necesarios que permitan detectar y corregir las posibles desviaciones entre los resultados obtenidos y los distintos objetivos marcados. Todo ello será objeto de estudio en las páginas que siguen.

Dada la filosofía de Dirección y Gestión Integrada que preside la presente obra, consideramos importante resaltar dos puntos que juzgamos de gran importancia. En primer lugar, que el proceso descrito en los párrafos anteriores, referido a la Dirección de Operaciones, no es más que una parte de la planificación y control empresarial. En segundo lugar, que dicho proceso debe estar coordinado con los que, paralelamente, se desarrollan en el resto de las funciones empresariales. Ambos aspectos se pondrán de relieve a lo largo de la presente obra.

La correcta planificación y control de la producción y de la capacidad, que introducimos en los Capítulos 1 y 2, deberá traer consigo la consecución de los objetivos del Subsistema de Operaciones (ligados a la inversión de enormes sumas, especialmente en el sector manufacturero) y, con ellos, de los de la empresa en su conjunto. Para facilitarlo, las actividades productivas, y muy especialmente la planificación y control, deben seguir un enfoque jerárquico que permita la

[2] J. A. D. Machuca, S. García, M. A. D. Machuca, A. Ruiz, M. J. Alvarez: «Dirección de Operaciones: Aspectos estratégicos en la producción y en los servicios», McGraw-Hill, 1994.

coordinación entre los objetivos, planes y actividades de los niveles estratégico, táctico y operativo. Ello quiere decir que cada uno perseguirá sus propias metas, pero teniendo siempre en cuenta las de nivel superior, de las cuales dependen, y las de nivel inferior, a las que restringen. Sin dicho enfoque será difícil, cuando no imposible, llegar a la integración de funciones, ir hacia la cada vez menos utópica Dirección y Gestión Integrada de la Empresa.

Las características propias de cada sistema productivo no deben alterar este enfoque jerárquico; sin embargo, aquéllas pueden influir en la forma concreta de llevarlo a cabo y en las técnicas a emplear en cada caso. Por lo que respecta a la Planificación Agregada y Maestra, las variaciones no serán muy significativas y la metodología que expondremos en el Capítulo 3 puede considerarse suficientemente representativa para la mayoría de situaciones reales, tanto en empresas de fabricación como de servicios. La factibilidad de los respectivos planes será estudiada, respectivamente, a través de técnicas de Planificación de Necesidades de Recursos (*Resource Requirements Planning*) y de Planificación Aproximada de Capacidad (*Rought-Cut Capacity Planning*).

Las diferencias fundamentales aparecerán en el nivel de planilficación operativa (programación de componentes) y en la más detallada, que se lleva a cabo en la fase de ejecución. Aquí no hay un método universal aplicable a todos los contextos y a todos los tipos de configuraciones productivas. Debido a ello, desarrollaremos aquellos enfoques y técnicas que juzgamos fundamentales en la moderna Dirección de Operaciones. Así pues, en los Capítulos 4 y 5, se trata la Planificación de Necesidades de Materiales (MRP) y la Planificación de Recursos de Fabricación (MRP de bucle cerrado y MRP II), muy adecuadas en entornos de producción multietapas con diversidad de productos que se fabrican por lotes y que poseen gran número de componentes. La filosofía integradora de esta metodología, así como sus últimos desarrollos, abren una esperanzadora vía hacia la gestión integrada de la empresa.

Cuando la diversidad disminuye y la repetitividad aumenta, la filosofía, también integradora, y el conjunto de técnicas aportadas por el Justo a tiempo (JIT) encuentran el marco más adecuado para su uso (Capítulos 6 y 7). (Con este enfoque es posible realizar simultáneamente la Programación de Componentes y la Gestión de Talleres. Aunque en algunos casos MRP se revelará como la vía idónea, en otros lo será el JIT. Sin embargo, en muchas ocasiones, ambos métodos pueden ser complementarios y utilizarse conjuntamente. Por otra parte, si bien algunos aspectos del JIT tienen un campo de aplicación más concreto, otros son utilizables y aconsejables en un enorme abanico de contextos.

En el Capítulo 8 estudiamos la Tecnología de Producción Optimizada (OPT: *Optimized Production Technology*) basada en la denominada Teoría de las Limitaciones (TOC: *Theory of Constraints*). Esta metodología se revela especialmente útil en aquellos procesos productivos en los que pueden aparecer «cuellos de botella» que limiten la capacidad de las instalaciones, ya sean provocados por el personal o por el equipo fijo. La filosofía TOC defiende que la correcta gestión de los cuellos de botella es la llave para lograr buenos resultados en la empresa. OPT comparte con MRP la ventaja de la simulación y aporta la posibilidad de trabajar con tiempos de suministro y tamaños de lote variables. Igual que ocurría con el JIT, OPT puede ser empleado conjuntamente con MRP, cuando con el primero se lleva a cabo la gestión de talleres y con el segundo el Plan de Materiales.

La diversidad de los productos puede ser muy elevada y con cambios frecuentes en el mix. Las empresas que trabajan en este entorno productivo, lo hacen, normalmente, sobre pedido, desarrollando gran número de productos en cantidades no muy elevadas. En este contexto podría emplearse OPT, pero existen, además, otros conjuntos de técnicas que pueden ayudar a resolver los problemas de planificación. Algunas, como el clásico gráfico de Gantt o las Listas de Prioridades, serán estudiadas en el Capítulo 9.

El caso de empresas que desarrollan un número reducido de productos de gran envergadura en pequeñas cantidades, y en las que suele trabajarse sobre pedido (por ejemplo: aeronáutica, construcción, obras públicas, etc.), es tratado en el Capítulo 10. En estas circunstancias, la planificación agregada se simplifica enormemente, pues cada proyecto se trata de forma separada, no siendo necesaria la programación maestra. Por lo que respecta a la planificación operativa, técnicas como PERT, CPM, ROY, etc., resultan de una ayuda inestimable. Evidentemente, habrá que asegurarse de que los proyectos son factibles desde el punto de vista de la capacidad, para lo cual los gráficos de carga y las técnicas de compatibilización y nivelación de recursos serán de gran utilidad.

Llegados aquí, quedan por tratar dos temas importantes. El primero es la Calidad (Capítulos 11 y 12), objetivo fundamental que, en nuestros días, ocupa una relevante posición como arma competitiva. Se estudiará cómo generarla y cuáles son los métodos de control más aplicados, tanto para los productos como para los procesos. El segundo y último aspecto a estudiar es la Gestión de Stocks para productos terminados y otros ítems con demanda independiente (Capítulo 13), dado que aquellos sujetos a demanda dependiente fueron tratados previamente. Se explicarán distintos modelos, tanto en universo cierto como en aleatorio y para distintas circunstancias.

Se cierra, así, el conjunto de actividades que caracterizan la Dirección y Gestión de Operaciones y que comenzaron en el primer libro de la presente obra con la determinación de la Estrategia de Operaciones. El esfuerzo, el tiempo y la dedicación a la realización de la misma han sido enormes, dada la gran complejidad y extensión de esta disciplina; esperamos que el resultado pueda ser de utilidad para profesores, directivos y alumnos.

No queremos terminar sin agradecer su colaboración y apoyo a todos aquellos que, directa o indirectamente, han colaborado con nosotros para que este libro viese la luz. En primer lugar, a numerosos profesores y amigos de las distintas universidades españolas que, con su aliento, nos ayudaron a seguir en el empeño. En segundo lugar, a aquellos que nos ofrecieron su tiempo (el recurso más preciado y escaso) para colaborar activamente en la redacción de algún cuadro o apartado (sus nombres aparecen en el texto) y aquellos otros que nos ayudaron en la relectura de originales y pruebas de imprenta (Pedro Garrido, Juan Antonio García Grajera, María del Mar González Zamora, Rafaela Alfalla Luque, Marisa Clavero Navajas y Rosa García Sánchez). En tercer lugar, a nuestra editorial y, especialmente, a Mariano Norte, que nos alentó, pero también sufrió con los eternos problemas de cumplimiento de programación y fechas de entrega. En cuarto lugar, a Francisco Javier Durán Muñoz, que mecanografió parte del texto y soportó mi escritura, frecuentemente ilegible, excepto para él, verdadero experto en jeroglíficos. También colaboraron en esta labor Charo Ferrer e Isabel García Martín. Por último (pero no en orden de importancia), a nuestras respectivas familias, que soportaron durante interminables meses nuestra, probablemente, excesiva dedicación a la obra que hoy presentamos.

JOSÉ A. DOMÍNGUEZ MACHUCA.
Sevilla, septiembre de 1994.

PARTE PRIMERA

PLANIFICACION, PROGRAMACION Y CONTROL DE LAS OPERACIONES

CAPITULO 1

INTRODUCCION A LA PLANIFICACION Y CONTROL DE LA PRODUCCION

1.1. INTRODUCCION

La Figura 1.1 muestra, de forma simplificada, las actividades que caracterizan al Subsistema de Operaciones. En la obra dedicada al estudio de los aspectos estratégicos (J. A. D. Machuca y otros, 1994) abordamos la determinación de la **estrategia productiva,** incluyendo los **objetivos** y el **diseño del subsistema**. Este se caracteriza por un conjunto de decisiones estructurales interrelacionadas, las cuales van a marcar la actividad productiva a medio y corto plazo. Hecho esto, conocemos ya qué **productos** o **servicios** vamos a elaborar y mediante qué **procesos**; asimismo, hemos decidido la **capacidad a largo plazo**, los **equipos** necesarios para conseguirla, así como la **localización** de la actividad productiva y la **distribución en planta** del equipo y del factor humano.

Con ello hemos fijado, pues, el **marco de referencia** que nos indica dónde queremos llegar, cómo y con qué medios; hemos determinado, pues, una **Estrategia de Operaciones**. A partir de dicho marco **se hace necesario, ahora, para el medio y corto plazo**:

- Concretar los objetivos.
- Decidir, respecto de los productos o servicios a elaborar, las correspondientes cantidades y momentos de tiempo que permitan alcanzar dichos objetivos (**planificación**).
- Determinar qué items[1] hay que producir o adquirir, y en qué momentos, para conseguir satisfacer lo establecido para los productos (**programación**).
- Ver qué actividades deberán desarrollarse en las distintas unidades productivas, y en qué momentos, con objeto de cumplir los requerimientos de componentes (**programación a muy corto plazo**).
- Tener en cuenta, en todos los niveles, los recursos disponibles, es decir, considerar **la problemática de la capacidad** de forma que se elaboren planes y programas factibles.
- Considerar las necesidades de materiales, tanto de productos terminados para los clientes como de materias primas y componentes intermedios para fabricación, de acuerdo con la planificación y programación elaborada (**planificación, gestión y control de inventarios**).

[1] A lo largo de la presente obra emplearemos las palabras **items** y **artículo** para designar indistintamente a productos terminados, subconjuntos, componentes e incluso materias primas.

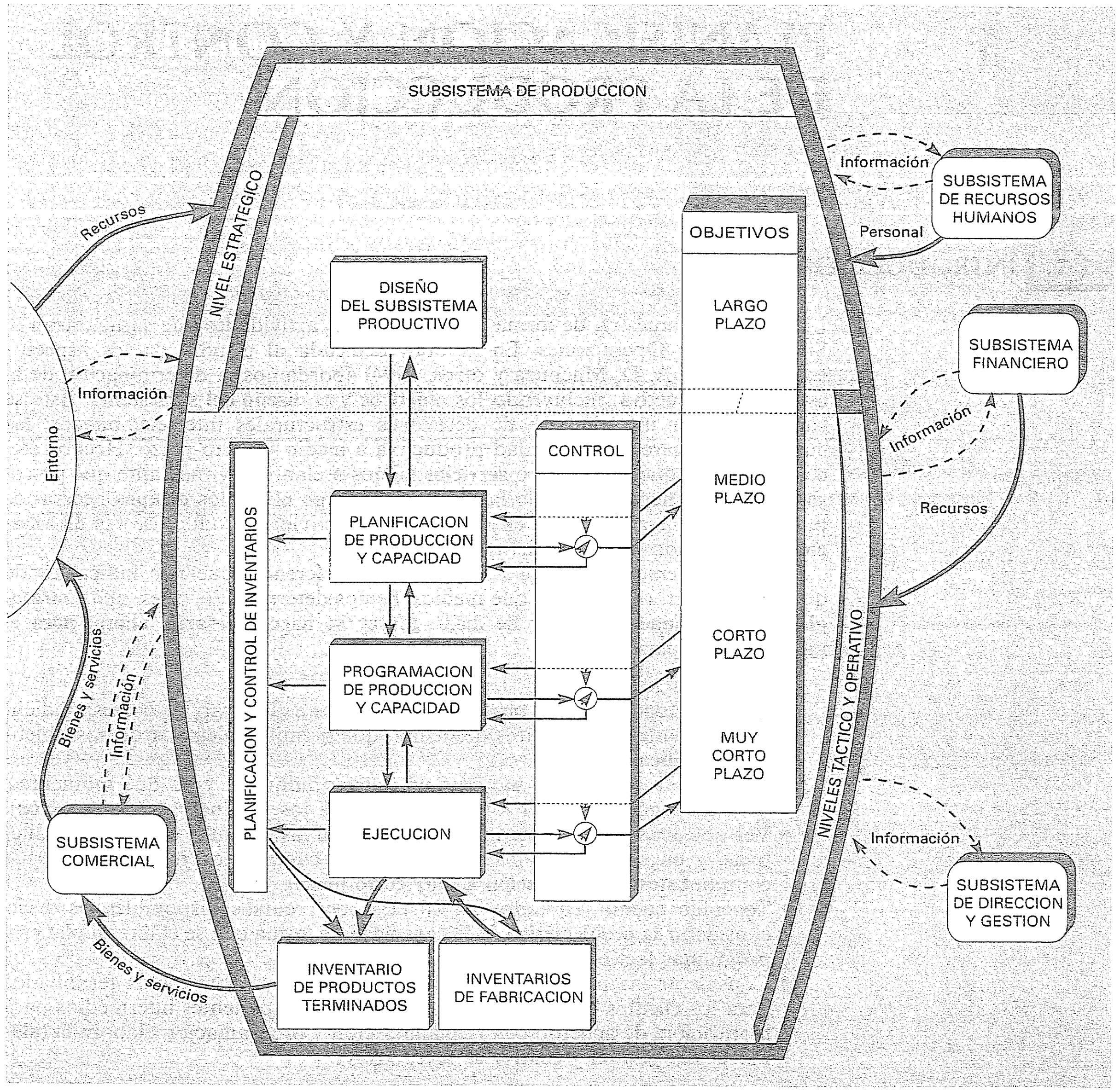


Figura 1.1. El Subsistema de Operaciones (J. A. D. Machuca y otros, 1994, Apartado 1.4.3).

En definitiva, en lo que se refiere a la función de operaciones, se trata de *proyectar el futuro deseado, los medios necesarios y las actividades a desarrollar para conseguirlo*, clásico concepto de **planificación** con el que coinciden en esencia numerosos autores[2]. Hecho esto podremos pasar a la fase de **ejecución** y llevar a cabo los **controles** necesarios, que permitirán detectar y corregir las posibles desviaciones entre los resultados obtenidos y los distintos objetivos marcados.

Dada la **filosofía de Dirección y Gestión Integrada** que preside la presente obra, debemos resaltar dos puntos que juzgamos de gran importancia. En primer lugar, que el proceso descrito en los párrafos anteriores, referido a la Dirección de Operaciones, no es más que una parte de la planificación y control empresarial, con la cual la relacionaremos seguidamente. En segundo lugar, que dicho proceso debe estar coordinado con los que, paralelamente, se desarrollan en el resto de las funciones empresariales. Ambos aspectos se pondrán de relieve a lo largo de la presente obra.

1.2. PLANIFICACION EMPRESARIAL Y PLANIFICACION DE OPERACIONES

Al hablar de la Planificación Empresarial, algunos autores consideran tres etapas básicas, las cuales aparecen en la Figura 1.2, que comentamos a continuación (Hampton, 1983, pág. 190 y siguientes):

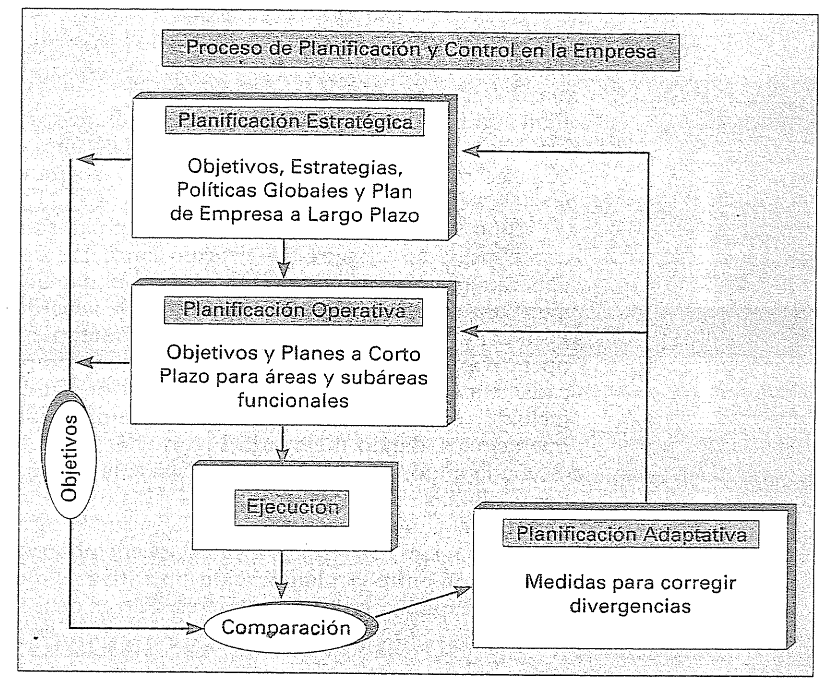


Figura 1.2. El Proceso de Planificación y Control Empresarial.

[2] Ver, por ejemplo, Ackoff (1972, pág. 13), Cuervo (1979, pág. 523), Steiner (1979, pág. 45), Bueno, Cruz y Durán (1990, pág. 202).

La **planificación estratégica**, en la que se establecen los objetivos, las estrategias y, en general, los planes globales a largo plazo, normalmente entre tres y cinco años[3]. Esta actividad es desarrollada por la Alta Dirección y se ocupa de problemas de gran amplitud, tanto en términos de actividades organizativas como de tiempo; debido a ello se emplean variables muy agregadas.

La **planificación operativa**, donde se concretan los planes estratégicos y los objetivos globales de la empresa para cada una de las áreas y subáreas funcionales, llegándose a un elevado grado de detalle. Así se establecen, además, las tareas a desarrollar para que se cumplan los objetivos y planes a largo plazo, indicando dónde, cómo y cuándo se llevarán a cabo. Se trata, pues, de una etapa en la que las actividades son más limitadas y abarcan un horizonte temporal relativamente corto, que puede ir de 18 meses o un año a varias semanas, dependiendo de cada caso concreto; en consecuencia, las variables que aquí se emplean estarán más desagregadas.

La **planificación adaptativa**, que pretende establecer las medidas correctoras necesarias para eliminar las posibles divergencias entre los resultados y los objetivos relacionados con ellos.

Hay que decir que existen planes difíciles de encuadrar de forma estricta en alguna de las fases mencionadas. Se trata de aquellos que concretan, para cada una de las áreas funcionales, la parte inicial del Plan Estratégico (normalmente uno o dos años) o de alguno de los planes a largo plazo que lo componen. Son planes que, por la longitud de su horizonte temporal y por la menor amplitud de los problemas tratados, no pueden considerarse propiamente dentro del nivel estratégico. Sin embargo, por utilizar unidades agregadas, cantidades periodificadas en intervalos amplios (meses o trimestres) y un horizonte que supera el corto plazo, tampoco encajan en la planificación operativa (es el caso, por ejemplo, del Plan Agregado de Producción, que estudiaremos en el Capítulo 3). Estos planes son imprescindibles y de gran importancia, pues conectan los objetivos y planes de largo plazo con los planes operativos, facilitando que la consecución de estos últimos impliquen el logro de los primeros.

Aunque cabrían otras opciones, participamos de la opinión de otros autores[4] que consideran un **nivel intermedio** entre los dos anteriormente mencionados, denominado **táctico o de medio plazo**, en el que quedarían encuadrados los planes a que aludíamos en el párrafo anterior. De acuerdo con ello, hemos modificado la Figura 1.2 introduciendo la **planificación táctica**, a caballo entre la estratégica y la operativa; con ello queremos resaltar que comparte algunas características de cada una de ellas y que tiene como misión fundamental el conectarlas. Hemos incluido, en paralelo, el proceso de planificación y control del subsistema de operaciones, dando lugar a la Figura 1.3.

En la citada figura puede observarse la lógica correspondencia entre las fases desarrolladas en el área productiva y las que representan a la planificación en el ámbito del conjunto empresarial, de la que la primera no es más que un subconjunto. En relación con la Figura 1.3, puede observarse, con trazo discontinuo, una intersección entre la planificación operativa y lo que en las empresas de fabricación se denomina gestión de talleres. Ello es debido a que, para ese nivel, también

[3] Respecto de la longitud del horizonte de planificación existen múltiples opiniones. En ese sentido puede verse, por ejemplo, Koontz y otros (1985, pág. 128 y ss.) citando estudios de la American Management Association y del Planning Executives Institute.

[4] Ver, por ejemplo, Dilworth (1993, pág. 146 y ss.), Heizer y Render (1991, pág. 532 y ss.), Aquilano y Chase (1991, pág. 532 y ss.), Anthony (1990, pág. 20 y ss.).

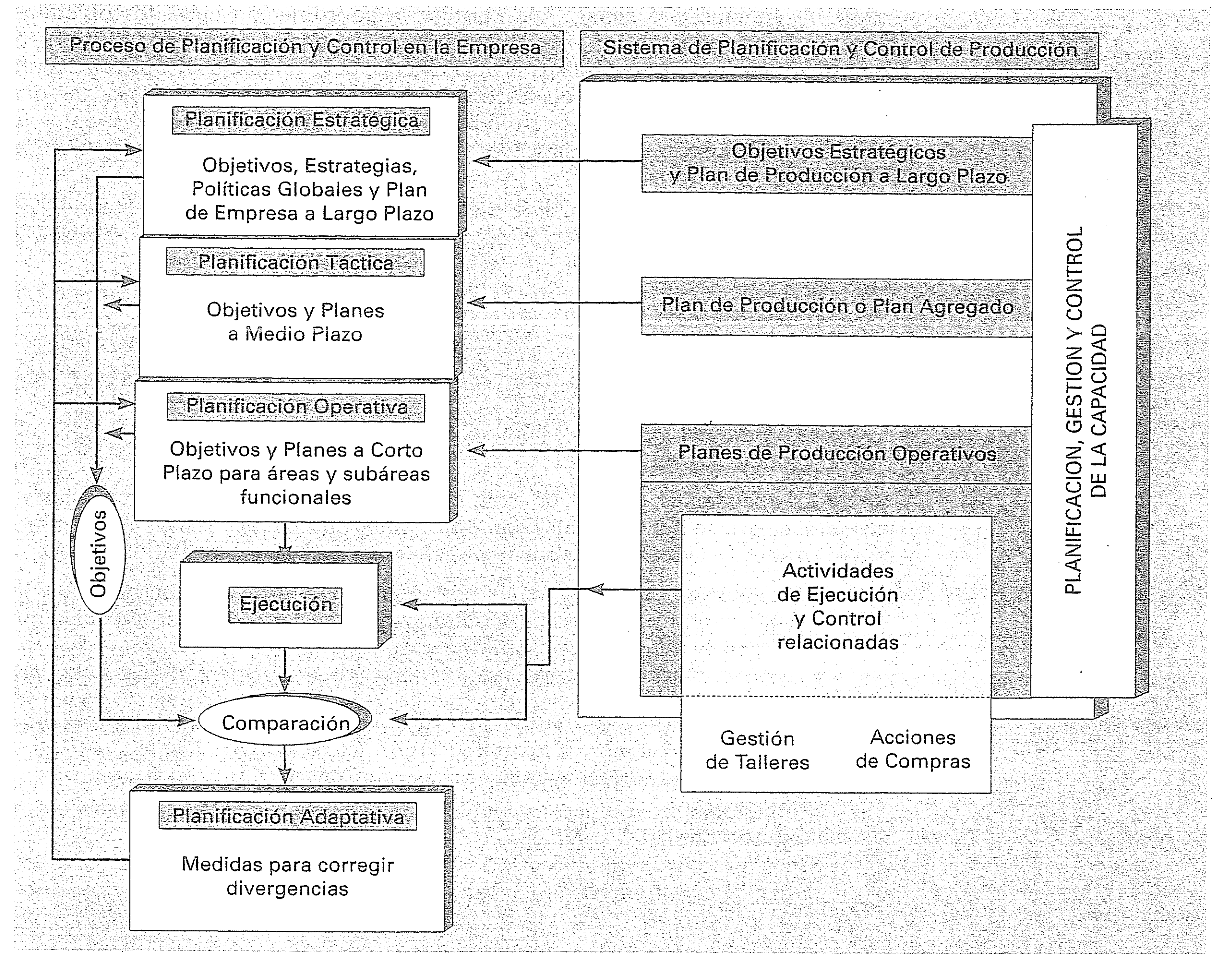


Figura 1.3. Correspondencia entre la Planificación y Control en el conjunto de la empresa y en el Subsistema de Producción.

es necesario elaborar un programa detallado de operaciones de lo que debe realizarse en cada unidad productiva en el muy corto plazo (semanas e incluso días), lo cual hace que en la ejecución de los planes operativos también se desarrolle una actividad de **planificación a muy corto plazo.**

1.3. ENFOQUE JERARQUICO PARA EL PROCESO DE PLANIFICACION Y CONTROL DE PRODUCCION

Antes de seguir adentrándonos en la presente obra conviene recalcar que las actividades productivas, y muy especialmente la planificación y control, deben

seguir un **enfoque jerárquico**[5] que permita la coordinación entre los objetivos, planes y actividades de los niveles estratégico, táctico y operativo. Ello quiere decir que cada uno perseguirá sus propias metas, pero teniendo siempre en cuenta las de nivel superior, de las cuales dependen, y las de nivel inferior, a las que restringen. Sin dicho enfoque será difícil, cuando no imposible, llegar a la integración de funciones, ir hacia la cada vez menos utópica Dirección y Gestión integrada de la empresa.

Son numerosas las formas en que puede estructurarse el proceso de planificación y control de la producción con un enfoque jerárquico[6], aunque la esencia sea siempre la misma. Nosotros la concretamos en la Figura 1.4 para una empresa de fabricación, en la cual el proceso es más complejo. En la citada figura pueden observarse cinco fases claramente diferenciadas:

- Planificación estratégica o a largo plazo.
- Planificación táctica o a medio plazo.
- Programación Maestra.
- Programación de componentes.
- Ejecución y Control.

Dado que dichos niveles de planificación van a utilizar distintos **tipos de unidades**, conviene aclarar cuáles son éstas, antes de seguir adelante. De menor a mayor grado de agregación, podemos distinguir:

— **Componentes**: cada una de las partes que integran el producto final.
— **Productos**: el bien o servicio, resultado final del proceso de producción, que será distribuido a los consumidores.
— **Familias**: un grupo de productos o servicios que tienen similares requerimientos de demanda, así como necesidades de procesamiento, trabajo y material comunes (Krajewski y Ritzman, 1990, pág. 482); de forma análoga es definida por DeLurgio y Bhame (1991, pág. 64) como «grupos lógicos de productos que tienen una fuente común de suministro y demanda, son producidos por equipos análogos y muchos de sus componentes de ensamblaje son similares o iguales».
— **Tipos**: grupos de familias que comparten una misma tendencia de comportamiento en su demanda (Bitran y Hax, 1977).

Hecha esta distinción, pasaremos a comentar brevemente las distintas fases del proceso de planificación jerárquica en el subsistema de operaciones (ver Figura 1.4).

La primera arranca de los objetivos estratégicos de la empresa[7], los cuales, teniendo en cuenta, entre otros factores, las previsiones de demanda a largo plazo, marcarán el **Plan de Ventas** para dicho horizonte temporal; aquí se indicarán las cifras de demanda que la empresa debería alcanzar para cumplir las metas de la firma. Este plan, conjuntamente con los citados objetivos, servirá para establecer el **Plan de Producción a Largo Plazo**, que nos indicará las cantidades a producir, en cifras trimestrales o anuales muy agregadas (tipos de producto). De dichos

[5] Expresión acuñada inicialmente por Hax y Meal para el subsistema productivo, es defendido para la planificación empresarial en su conjunto por conocidos autores, como, por ejemplo, Koontz (1985).
[6] Ver, por ejemplo, Mackulak y otros (1980, pág. 455 y ss.), Bitran y otros (1982, pág. 232 y ss.), Gelders y otros (1982, pág. 27 y ss.), Erschler y otros (1986 pág. 464 y ss.), Heizer y Render (1991, pág. 534 y ss.), Vollmann y otros (1991, pág. 40 y ss.), Aquilano y Chase (1991, pág. 401 y ss.).
[7] Ver, J. A. D. Machuca y otros (1994, Capítulos 2 y 3).

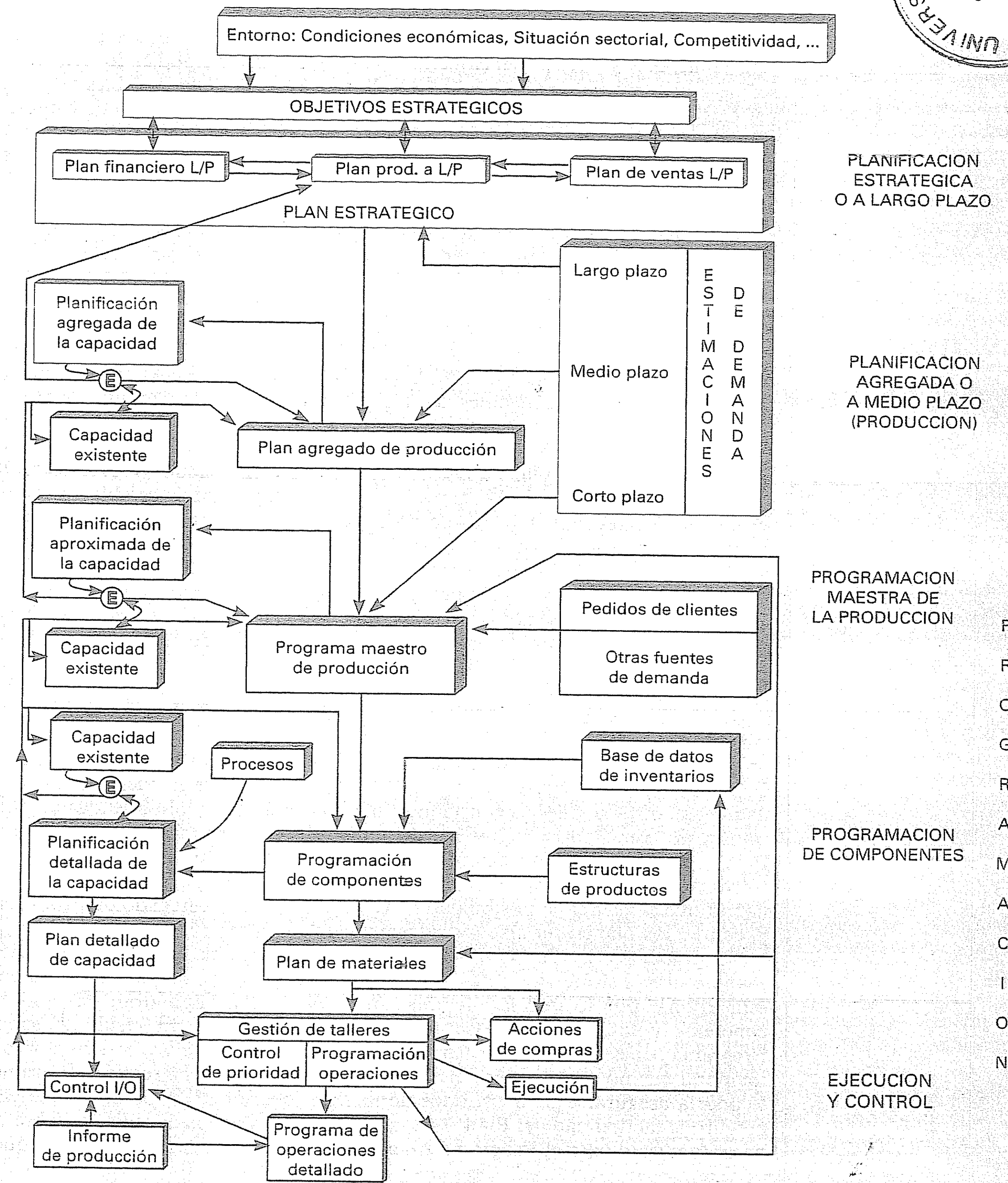


Figura 1.4. Estructura de un sistema jerárquico de planificación y control de la producción.

planes derivarán las necesidades de recursos para llevarlos a cabo, lo cual generará, junto con los ingresos previstos por ventas, el **Plan Financiero a Largo Plazo**. Lógicamente, los planes mencionados deben ser factibles, pudiendo ocurrir que sea necesario modificar alguno o todos ellos en función de las posibles restricciones existentes. Incluso los objetivos estratégicos podrían ser objeto de cambio si su consecución implicara planes no viables. El conjunto de los tres planes mencionados conforma la base del **Plan Estratégico o Plan de Empresa**, que debe tener en cuenta la situación en el sector, consideraciones sobre competitividad y previsiones sobre las condiciones económicas en general. Este plan puede considerarse como un acuerdo entre todas las áreas mencionadas, pero también con Ingeniería e Investigación y Desarrollo, acerca de los objetivos a alcanzar y de la forma de conseguirlos.

A este nivel, las actividades de planificación de la producción se centrarán en el desarrollo de nuevos productos o modificación de los existentes, en tecnologías y procesos, así como en la valoración de las necesidades de capacidad derivadas del plan a largo plazo; se estudiará la conveniencia o no de crear nuevas instalaciones o modificar las existentes, así como los momentos de tiempo más idóneos para llevar a cabo dichas decisiones.

La siguiente etapa del largo y complejo camino que nos llevará desde el plan de producción a largo plazo a la ejecución es la **Planificación Agregada**. Esta fase consiste en concretar algo más el mencionado plan; se trata de establecer, todavía en unidades agregadas (familias de productos), pero para períodos normalmente mensuales, los valores de las principales variables productivas (cantidades de productos, inventarios, nivel de mano de obra, etc.), teniendo en cuenta la capacidad disponible e intentando que permita cumplirse el Plan a Largo Plazo al menor coste posible. Esta etapa, que también se denomina **Planificación a Medio Plazo**, finaliza con el establecimiento de **dos planes agregados: el de producción y el de capacidad**. Dado que será difícil conseguir el mencionado grado de concreción para períodos que vayan más allá de 18 meses (ver Capítulo 3, Apartado 3.1), estos planes sólo abarcarán la primera parte del plan de producción a largo plazo (ahora bien, hay que recalcar que deberán coincidir las respectivas cifras de producción total para el mencionado período). En cuanto al Plan Agregado de Capacidad, deberá tenerse en cuenta que, para el horizonte en cuestión, la capacidad de las instalaciones se considerará fija, permitiéndose sólo medidas de ajuste transitorio (ver Capítulos 2 y 3), con las cuales se asegurará la factibilidad del Plan Agregado de Producción mediante la denominada Planificación de las Necesidades de Recursos *(Resource Requirements Planning)*. Si ello no es posible, habría que pensar en la posibilidad de modificar el Plan Agregado de Producción y, con él, los planes del nivel estratégico.

El grado de detalle del Plan Agregado, que permite la coordinación de la Planificación Estratégica y de la Operativa, no es suficiente para llevar a cabo esta última, por lo que las distintas familias se descompondrán en **productos** concretos y los períodos pasarán de meses a semanas. El resultado será el **Programa Maestro de Producción** *(Master Production Schedule)*, con un horizonte temporal que no suele superar el año, dado que la concreción requerida raramente podría asegurarse para períodos de tiempo superiores[8]. A pesar de que ya se aseguró la factibilidad del Plan Agregado en relación con la capacidad, habrá que hacer lo mismo para el Programa Maestro. Ello es debido, por una parte, a que el

[8] Nótese que la diferencia básica entre el Plan Agregado y el Programa Maestro está más en el grado de detalle que en la longitud total del horizonte de planificación.

nivel de desagregación es mayor (en productos y períodos de tiempo) y, por otra, al hecho de que, aunque la capacidad disponible para períodos mensuales sea suficiente de forma agregada, ello no quiere decir que no puedan existir desajustes semanales[9]. Por tanto, se deberá realizar un **análisis aproximado de capacidad** *(Rough-cut)*, en el que se tendrán en cuenta las necesidades derivadas de actividades distintas de la elaboración de productos terminados (por ejemplo, piezas de repuesto, transferencia a otras plantas, etc.). Posibles problemas de factibilidad no resolubles a este nivel podrían hacer necesario rehacer el Plan Agregado, dado que debe darse compatibilidad entre ambos. El Programa Maestro obtenido debería tener suficiente estabilidad como para que la fabricación pudiese garantizar su ejecución y suficiente flexibilidad como para obtener una respuesta competitiva ante posibles cambios en la demanda.

En las dos últimas fases mencionadas deben tenerse en cuenta las estimaciones de demanda, respectivamente, a medio y corto plazo. Cuando la empresa trabaje bajo pedidos, la concreción de estos últimos hará que vayan sustituyendo a la información previsional y adecuándola a la realidad inmediata.

Estamos en condiciones de comenzar la cuarta etapa, en la que se llevará a cabo la **programación detallada** (en cantidades y momentos de tiempo) **de los componentes** que integran los distintos productos y la **planificación detallada de la capacidad** requerida por los mismos (esto se hará para cada centro de trabajo). Deberá conseguirse que se cumpla el programa maestro de fabricación, el cual, si existen problemas irresolubles de disponibilidad respecto a la capacidad existente, deberá ser reajustado. El resultado de este proceso, por lo que respecta a producción, es la obtención del denominado **Plan de Materiales**.

Siguiendo con el proceso de planificación jerárquica, entraremos en la última fase, que implicará la **ejecución y control** del Plan de Materiales. Para ello, éste se traducirá, por un lado, en una **programación de operaciones** en los centros de trabajo que tenga en cuenta las **prioridades** de fabricación y, por otro, en las **acciones de compra** de las materias primas y componentes que se adquieren en el exterior. También será necesario realizar aquí un control de la capacidad, pero de tipo detallado (por ejemplo, **control input/output**), el cual proporcionará retroalimentación a este nivel y a los niveles superiores. Hay que hacer notar que esta fase no es sólo de ejecución y control, pues también se realizan actividades de programación a nivel muy detallado.

Las fases anteriormente expuestas se deben llevar a cabo en cualquier empresa manufacturera, independientemente de su tamaño y actividad, aunque, lógicamente, la forma en que éstas se desarrollen dependerá de las características propias de cada sistema productivo (J. A. D. Machuca y otros, Capítulo 5). *Lo que siempre debería ser un factor común ineludible es el enfoque jerárquico mencionado, de forma que se facilitase la coordinación en el desarrollo de las distintas etapas y, con ello, la consecución de los objetivos de los niveles superiores.* Esto también es cierto para las **empresas de servicios**, aunque en la mayor parte de ellas el proceso será más simple que el aquí expuesto. Precisamente hemos escogido el ejemplo de una empresa de fabricación por su mayor complejidad y por englobar, claramente diferenciadas, todas las fases del proceso jerárquico de planificación.

Sin embargo, no debemos olvidar que *la aproximación jerárquica es condición necesaria, pero no suficiente, para lograr* la mencionada *integración*, la cual contempla, en sentido vertical, de lo global a lo concreto. *Falta tener en cuenta,* en

[9] Ejemplo: Capacidad mensual disponible = 200 ⇒ 50 un./semana, lo cual no satisfaría unas necesidades semanales de 40, 60, 30, 70, aunque dichas cifras sumen 200 como total mensual.

sentido horizontal, *la integración entre las distintas áreas de la empresa*; por ello, *el proceso de planificación y control de la producción debe desarrollarse de forma coordinada con aquéllas*, pues influirán en el mismo, tanto más cuanto más alto sea el nivel en que nos encontremos. A lo largo de los capítulos que siguen, en los que desarrollaremos las distintas etapas del proceso estudiado, resaltaremos las relaciones que, en cada una de ellas, se producen con las distintas áreas de la firma.

La Figura 1.5 resume las fases anteriormente mencionadas junto con los planes que de ellas derivan; todo ello relacionado, por un lado, con los niveles de planificación empresarial y, por otro, con la planificación y gestión de la capacidad.

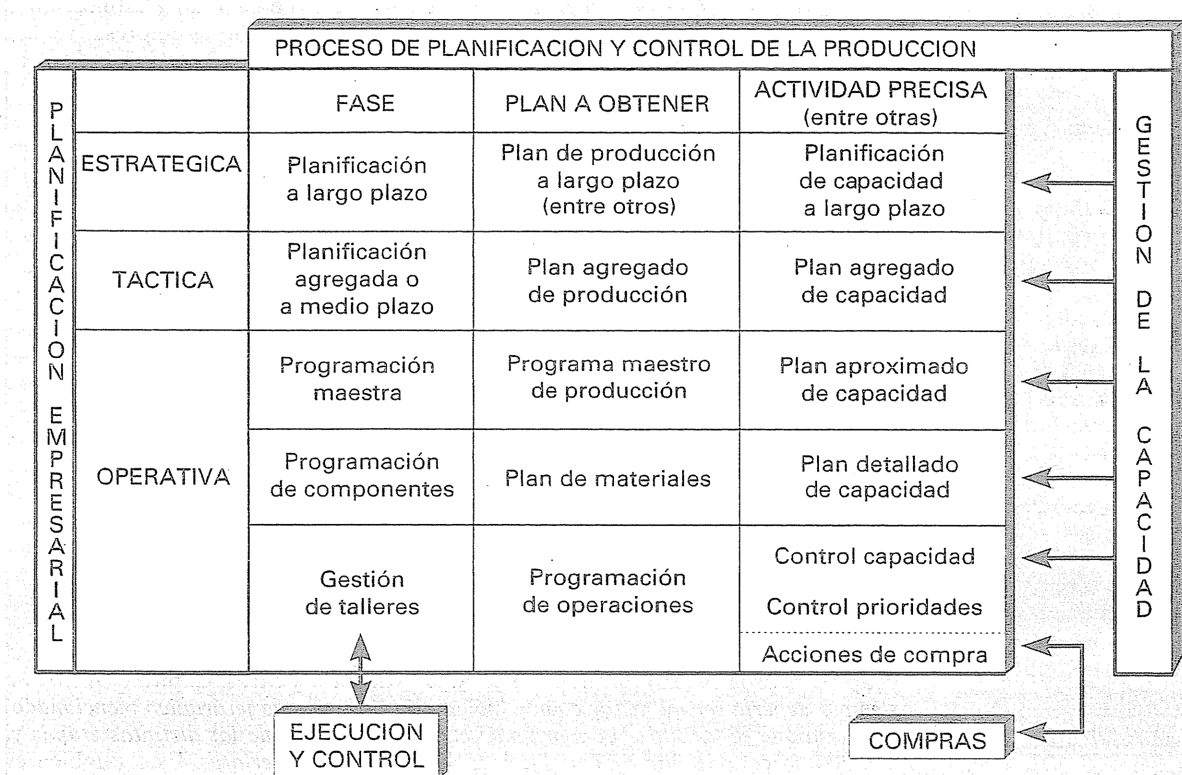


Figura 1.5. Proceso de planificación y control de la producción.

1.4. INTRODUCCION A LA PLANIFICACION Y CONTROL DE INVENTARIOS

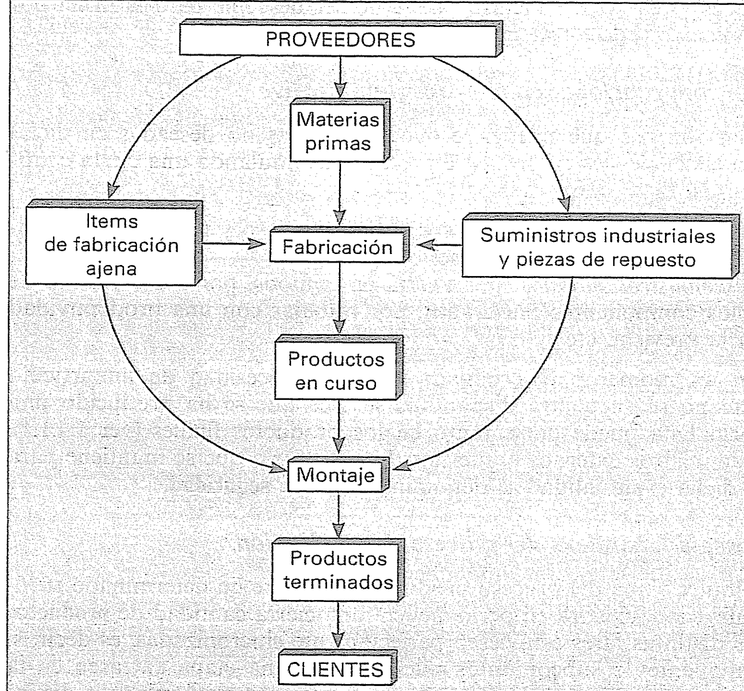
Aunque no se haya dicho de forma explícita en el apartado precedente, es evidente que, para lograr los resultados previstos en la planificación y control de

la producción, es obligado realizar, en paralelo, una adecuada planificación y control de los materiales necesarios para llevarla a cabo, así como de los propios productos finales. Introducir este importante tema es precisamente el objeto del presente apartado.

Los **inventarios, o stocks**, son considerados tradicionalmente como una inversión[10], pues se definen como cualquier recurso ocioso que es almacenado en espera de ser utilizado. De dicha definición se deduce que éstos se encuentran presentes en cualquier empresa: las firmas fabriles mantienen stocks de materias primas, componentes de elaboración propia o adquiridos en el exterior, productos en curso y terminados, así como herramientas, piezas de repuesto para la maquinaria y otros múltiples elementos (Cuadro 1.1); las firmas de distribución almacenan básicamente productos terminados; etc. En definitiva, tanto en las empresas de producción como en las de servicios (grandes almacenes, hospitales, bancos, líneas aéreas, etc.) están presentes los inventarios. Sin embargo, estas últimas suelen tener un volumen de inversión por dicho concepto bastante menor que el de las empresas manufactureras, donde el correspondiente capital inmovilizado puede llegar a representar un elevado porcentaje del activo.

Cuadro 1.1. Tipos básicos de stocks en una empresa fabril

Figura 1.6. Inventarios y procesos de fabricación



Tipos básicos de stocks

- **Piezas de repuesto.** Necesarias para evitar paradas en los equipos (mantenimiento).
- **Suministros industriales.** Materiales que se emplean en el proceso y que no llegan a formar parte del producto terminado. Así sucede con las herramientas, lubricantes, disolventes, etc., necesarios para un buen funcionamiento del equipo.
- **Materias primas.** Empleadas en la fabricación tal como se reciben del proveedor.
- **Items de fabricación ajena,** los cuales conviene adquirir en el exterior en lugar de fabricarlos en la empresa. No sufren transformación en la empresa.
- **Productos en curso.** Ya han sido transformados en la fábrica a partir de su estado bruto y son almacenados siguiendo las necesidades de la producción.
- **Productos terminados.** Son artículos totalmente elaborados, controlados y aprobados por la inspección final y listos para su expedición.

[10] Como veremos en el Cuadro 1.2, esta concepción ha traído consigo efectos negativos para las empresas.

Ante dicha realidad, que repercute sin duda negativamente en la rentabilidad de la empresa y en los costes de los productos, podríamos preguntarnos cuáles son las razones que provocan el mantenimiento de stocks. ¿Por qué las empresas inmovilizan con frecuencia enormes cantidades de dinero en recursos ociosos? La respuesta la encontraremos al analizar el apartado siguiente.

1.4.1. Razones que justifican la existencia de inventarios

Las principales funciones de los inventarios, que enumeramos y describimos a continuación, son múltiples y diversas, pudiéndose dar todas o sólo una parte de las mismas según el tipo de empresa, tanto en el sector productivo como en el de servicios.

1.4.1.1. *Hacer frente a la demanda de productos finales*

Si la demanda de los clientes fuese conocida con certeza y, además, la producción se realizase de forma que ambas coincidiesen exactamente en fecha y cantidad, no sería necesario almacenar productos finales. Sin embargo, siempre existe un cierto grado de aleatoriedad en dicha demanda; ello empuja a las empresas a mantener un cierto stock de dichos items para absorber un determinado rango de las posibles variaciones. Por otra parte, hacer que la producción siga exactamente a la demanda no es tarea fácil, e incluso puede no ser deseable para la firma por razones económicas o/y de estrategia (ver Capítulo 3).

1.4.1.2. *Evitar interrupciones en el proceso productivo*

Son diversas las razones que pueden provocar paradas no deseadas en dicho proceso, contra las cuales las empresas se protegen acumulando una cierta cantidad de inventarios. Estas son:

- *Falta de suministros externos:* retrasos en la entrega o/y recepción de pedidos en cantidades inferiores a las solicitadas.
- *Falta de suministros internos:* por avería en equipos, por mala calidad de parte de los componentes elaborados, por trabajar con una productividad inferior a la prevista, etc.

Cuando en un momento determinado existe la necesidad de un artículo concreto, y éste no se encuentra disponible, se dice que se ha producido una **ruptura de stock**. Esta puede darse tanto en los productos finales (ver 1.4.1.1), como en los suministros externos e internos. El inventario que se mantiene para hacer frente a dicha eventualidad se denomina **stock de seguridad**.

1.4.1.3. *La propia naturaleza del proceso de producción*

Dado que cualquier etapa del proceso productivo requiere un determinado tiempo para su realización, existirá en permanencia una cierta cantidad de **productos en curso**. Si las distintas fases estuviesen perfectamente sincronizadas, es decir, si todos los componentes o subconjuntos que salen de una etapa entrasen en la siguiente sin esperas intermedias (debidas al transporte entre máquinas, a distintas velocidades de fabricación, etc.), dicho stock se reduciría al mínimo. Sin embargo, como veremos a lo largo de la presente obra, aunque a veces puede tenderse a ello, no es lo más frecuente en la práctica.

1.4.1.4. *Nivelar el flujo de producción*

La nivelación de la producción es una de las posibles estrategias de planificación para las empresas (ver Capítulo 3). Cuando ello es así y nos encontramos con una demanda variable (por ejemplo, demanda estacional), una posible solución es fabricar por encima de la demanda en épocas bajas y almacenar el exceso de producción para emplearlo en aquellos momentos en los que la demanda supera la capacidad de la firma.

1.4.1.5. *Obtener ventajas económicas*

Con frecuencia nos encontramos con que comprar o producir cantidades superiores a las que van a consumirse inmediatamente puede reportar ventajas económicas a la empresa. Ese es el caso, por ejemplo, de rebajas en el precio al aumentar el tamaño de los pedidos de suministros externos, de elevados costes ligados a la preparación de los equipos productivos cada vez que va a fabricarse un nuevo lote de items, etc. En dichos casos, puede decidirse trabajar con grandes lotes que se almacenan para su posterior consumo; claro está que, como veremos más adelante, no sólo habrá que tener en cuenta los ahorros derivados de tal política, sino también sus posibles repercusiones negativas, como, por ejemplo, el consiguiente aumento de los costes provocados por el almacenamiento. Estos y otros factores son considerados conjuntamente para definir algunas políticas de gestión de inventarios (ver, por ejemplo, los Capítulos 4 y 13).

1.4.1.6. *Falta de acoplamiento entre la producción y el consumo*

Es una causa típica de las empresas agrícolas, en las que la producción se obtiene en un período determinado, pero el consumo se realiza a lo largo de todo el año.

1.4.1.7. *Ahorro y especulación*

Cuando se prevé un alza en los precios, puede ser interesante adquirirlos antes de que éste se produzca y almacenarlos hasta el momento de su consumo (ahorro) o venta (especulación), en un momento posterior a la subida.

Como puede deducirse de lo expuesto anteriormente, los stocks pueden ser necesarios o deseables por diversas razones. Sin embargo, muchos de los factores comentados son problemas ante los cuales muchas empresas decidieron hacer frente utilizando inventarios sin pararse a estudiar las causas de los mismos. En el momento actual, y desde hace ya algunos años, existe una conciencia creciente de que dicha actitud no es la más conveniente[11]. La solución tradicional es un remedio caro que, además, no soluciona los problemas mencionados por carecer de un enfoque sistémico y causal de la empresa. Muchos de estos problemas están provocados por diversos factores que, si bien no pueden ser eliminados en su totalidad, al menos pueden mitigarse: averías de máquinas por falta de un adecuado mantenimiento preventivo, descensos en la productividad por falta de motivación del personal, necesidades no satisfechas por baja calidad en los componentes o/y productos, retrasos en las entregas por una incorrecta planificación, y tantos otros. La tendencia actual es hacer frente a dichos problemas a través de diversos cauces, frecuentemente interrelacionados, algunos de los cuales iremos

[11] El Cuadro 1.2 muestra los efectos negativos del mantenimiento de un excesivo nivel de inventarios sobre la liquidez y la rentabilidad de la empresa.

viendo a lo largo de la presente obra, tales como: especial atención a la calidad, utilización de enfoques adecuados en la planificación y control de la producción, mejoras en los equipos y métodos de trabajo, mejora de la relación con los proveedores y con los clientes, disminución de los costes de preparación de los equipos productivos para realizar un pedido, etc.[12]. A pesar de lo anterior, no será posible eliminar completamente los inventarios y será necesario realizar una adecuada planificación, gestión y control de materiales. Las dos cuestiones fundamentales a resolver, y algunos factores que influyen en su respuesta, son abordados en el apartado siguiente.

Cuadro 1.2. Efectos de los inventarios sobre la rentabilidad de la empresa (realizado por Ignacio Contreras Mora)

Independientemente de las posibles repercusiones concretas sobre el Departamento de Producción, las consecuencias globales en las finanzas empresariales de una política de disminución de inventarios son análogas a las que se derivarían del decremento en cualquier otra partida del activo circulante de explotación (por ejemplo, las del disponible o exigible).

Tradicionalmente se ha venido considerando como adecuado, desde el punto de vista de la solvencia y capacidad a corto y medio plazo, un capital circulante elevado, o incluso sobredimensionado, yendo, pues, en esa línea la política de inventarios. Aunque no son pocos los expertos que aún asumen dicha premisa valorativa, en los últimos años se está produciendo una fuerte y razonada tendencia al cambio, que implica no sólo a las prácticas y técnicas relativas a la disminución de inventarios, sino al resto de las partidas del activo circulante vinculado a la explotación.

¿Cuáles son los motivos que justifican dicha tendencia? o, lo que es lo mismo, ¿qué consecuencias conlleva la disminución del capital circulante sobre los resultados de la empresa? Asumiendo el análisis, vamos a distinguir entre las consecuencias que muestran una incidencia sobre la corriente monetaria y aquellas otras que inciden sobre la corriente de renta. Asociados a la primera se encuentran conceptos como los de tesorería o liquidez; asociados a la segunda, los de beneficio y rentabilidad.

Consecuencias sobre la liquidez

Es errónea la creencia de que el beneficio obtenido por la empresa debe reflejarse en la situación de tesorería de la misma. En otras palabras, muchas empresas rentables presentan suspensión de pagos e, igualmente, no debe resultar extraño que empresas en situación de pérdidas presenten superávit de tesorería. El beneficio es una cifra que resulta de una estimación arbitraria y subjetiva; la tesorería es una realidad, muchas veces cruel, que no sólo tiene reflejo en los «libros» de la sociedad. Si bien para la cifra de beneficios intervienen ciertas partidas concretas de ingresos y gastos, todo proceso económico o financiero de la empresa tiene una fiel traducción en la tesorería, aunque nos referiremos únicamente a los relativos a los inventarios. Como justificaremos a continuación, **un incremento en los stocks penaliza la situación de liquidez en relación con la cifra de beneficio obtenida. Por el contrario, un decremento de inventarios contribuye a un aumento de los resultados líquidos por encima de la cuantificación del beneficio.**

La justificación de dicha aseveración es sencilla si pensamos que la tesorería es obtenida como diferencia entre cobros y pagos, mientras que el beneficio lo es como diferencia entre ingresos y gastos. Así, de acuerdo con los principios contables, en el caso de los inventarios de materias primas, imputamos al beneficio los costes derivados del **consumo** de materiales y a la tesorería los **pagos** anuales provocados por las compras. Es decir, la afección a tesorería de dichas compras es inmediata, mientras que la afección a renta no se realizará en tanto dichas compras no sean consumidas. Por ello, si en un ejercicio aumenta el valor de las existencias, se habrá producido un flujo monetario de salida sin traducción en el consumo de materiales; ello conllevará una disminución en la tesorería mayor que la provocada en el beneficio. Del mismo modo, si disminuyen los inventarios, el valor de los pagos será inferior al consumo, por lo que la afección a tesorería será inferior que la provocada por el consumo en el beneficio. Es obvio que la anterior argumentación, relativa al inventario de materias primas, es perfectamente extrapolable al resto de los inventarios.

En el párrafo anterior hemos supuesto el caso más simple de pago al contado; cuando esto no ocurre, se incrementará la partida de cuentas por pagar, por lo que el análisis de la incidencia de la variación de inventarios sobre la liquidez deberá contemplar este hecho. Así, un incremento en los stocks puede ser compensado por una mejora en las condiciones de crédito de los proveedores; es evidente que si esta última va unida a una disminución de aquéllos, el efecto inducido sobre la liquidez será aún más favorable.

Consecuencias sobre la rentabilidad

La rentabilidad neta de una empresa, RN, viene determinada como diferencia entre la rentabilidad proporcionada por el conjunto de activos de la empresa, RA, y el coste soportado por el pasivo estable de la misma, (coste medio ponderado de los capitales permanentes, KMP): RN = RA — KMP.

Asumiendo dicha formulación, las consecuencias sobre RN de una disminución de inventarios se materializan a través de dos vías: la que procede de los efectos sobre la rentabilidad del activo y la que tiene su fuente en el coste del pasivo.

La **rentabilidad del activo** se suele determinar como cociente entre el beneficio antes de intereses, BAI, y el activo total, AT, de la empresa: RA = BAI/AT. También podría calcularse a partir del beneficio antes de intereses e impuestos, BAIT, como RA = BAIT/AT. En cualquier caso, si suponemos que la disminución de inventarios no ha alterado las condiciones económico-productivas de la empresa (lo que se traduce en una estabilidad del BAI)*, **una reducción de inventarios implica** un menor dimensionamiento del activo. Ello se traduce en un menor denominador y, por tanto, en **un mayor valor de RA.**

En lo que se refiere al **coste del pasivo**, éste debe ser calculado sobre los pasivos permanentes de la empresa, que han de mantener un cierto equilibrio con los capitales permanentes de la misma, ya que éstos determinan la necesidad de financiación a largo plazo. Dado que

$$\text{Capitales permanentes} = \text{Activo fijo} + \text{Capital circulante} \quad [1]$$

$$\text{Necesidad de financiación a largo} \equiv \text{Capitales permanentes} \quad [2]$$

al conseguir una **reducción de inventarios** y, con ello, de capital circulante, disminuyen también los capitales permanentes de la empresa (expresión [1]). Consecuentemente, se producirá un decremento en las necesidades de financiación que aquéllas implican (expresión [2]).

Por tanto, *el efecto de una buena política de reducción de inventarios sobre la rentabilidad de la empresa es doble, pues incide positivamente en los dos componentes que la determinan:* por una parte aumenta la rentabilidad que proporcionan los activos; por otra, disminuye el volumen de pagos por retribución del pasivo estable.

* Resulta perfectamente plausible lograr una disminución de stocks y no perjudicar las condiciones de generación de renta de la empresa en base a las técnicas de reducción de inventarios. Por el contrario, el buen uso de dichas técnicas puede mejorar dichas condiciones logrando una disminución de los costes de posesión sin alterar el potencial comercial.

[12] Scott (1994, pág. 338 y ss.) comenta con cierto detalle algunos de los factores determinantes de los distintos tipos de inventario, así como las circunstancias y/o causas que generan dichos factores.

1.4.2. Las dos cuestiones fundamentales en la planificación de materiales

Son dos las preguntas básicas e interrelacionadas que deben ser respondidas en cualquier sistema de planificación de inventarios:

- ¿**Cuándo** (en qué momentos) **deben realizarse los distintos pedidos** de material?
- ¿**Cuánto debe pedirse de cada material al emitir un pedido**? o, lo que es lo mismo, ¿cuál debe ser el tamaño de los lotes a solicitar?

La respuesta a estas cuestiones *dependerá de diversos factores*, algunos de los cuales comentamos a continuación. El resultado será el empleo de distintos sistemas de planificación de materiales (ver parte segunda de la presente obra).

1.4.2.1. *Características de la demanda*

En algunas ocasiones podemos encontrarnos con un determinado producto cuya demanda, aleatoria o no, se produce una sola vez y, por tanto, los items necesa-

rios para su elaboración serán almacenados un solo período. En dichas circunstancias se realiza una **planificación de inventarios** que se denomina **de ciclo único o monoperiódica**. Sin embargo, lo más frecuente es que la demanda de materiales (productos terminados, en curso, componentes, etc.) se mantenga a lo largo del tiempo, bien sea con carácter continuo o discontinuo, de forma regular o irregular. En dichas circunstancias, los modelos de ciclo único no son apropiados y se emplean **métodos de planificación multiperiódica**. El consumo de los items en inventario puede proceder de dos tipos de demanda. Para un cierto grupo, existirá una **demanda independiente**, que será aleatoria en función de las condiciones del mercado y no estará relacionada directamente con la de otros artículos. Es el caso de los productos terminados adquiridos por los clientes o de las piezas que se venden como repuestos para aquéllos. Por el contrario, muchos items tienen una **demanda dependiente** de las necesidades de otros artículos almacenados. Como ejemplo podemos citar los componentes de un producto complejo (tal como un frigorífico o un automóvil) cuyo consumo dependerá del número de unidades a fabricar del producto final decidido en la planificación de la producción. En este último caso, la demanda de componentes puede calcularse prácticamente con certeza en base a dichas necesidades, mientras que en el primer caso deberán emplearse estimaciones realizadas en base a previsiones y a pedidos de clientes. Otro factor diferenciador suele ser el **carácter continuo o discreto** de la demanda, que suelen corresponder, respectivamente, a la demanda independiente y a la dependiente.

Las distintas características mencionadas hacen aconsejable emplear distintos métodos, según el tipo de demanda, para responder a las dos preguntas básicas enunciadas anteriormente. Así, para la demanda independiente son aplicables las denominadas **técnicas clásicas** (Capítulo 13), basadas en la optimización de los costes totales que intervienen en la gestión de inventarios y en el cálculo de un cierto stock de seguridad en función de la aleatoriedad existente y del riesgo de ruptura de stocks que la empresa esté dispuesta a asumir. Por el contrario, ante una demanda dependiente, es fundamental la coordinación entre la planificación de inventarios y la de la producción con ella relacionada. En este contexto la gestión clásica no es eficiente y se acude a métodos relativamente nuevos, como **MRP** (planificación de las necesidades de materiales, Capítulos 4 y 5) o **JIT** (justo a tiempo, Capítulos 6 y 7). En los capítulos mencionados profundizaremos más sobre las características y peculiaridades de dichos sistemas y de los factores que hacen aconsejable su uso.

1.4.2.2. *Costes relacionados con los inventarios*

Es evidente que el mantenimiento de stocks es oneroso pero que también su falta en el momento en que son necesarios provoca costes en la empresa. Así pues, el nivel de inventarios, relacionado con las dos preguntas básicas (cuánto y cuándo pedir), tiene efectos contrapuestos sobre distintos tipos de costes. Como se indicó en 1.4.1, este hecho es básico para la toma de decisiones en la gestión de stocks clásica pero, aunque con un papel menos importante, también se considera, de forma directa o indirecta, en los métodos modernos de planificación de materiales. Por ello relacionamos, en el Cuadro 1.3, los principales costes a tener en cuenta en este ámbito.

Cuadro 1.3. Principales costes en la gestión de inventarios

Coste de posesión, Cp: El simple hecho de mantener un inventario da lugar a una serie de costes con distinto origen, los cuales se aglutinan en el denominado coste de posesión. La inversión en inventarios lleva asociado un *capital inmovilizado* no sólo en stocks, sino en espacio, edificios, equipos, etc, necesarios para asegurar un correcto almacenamiento y manipulación. El coste de la financiación correspondiente debe computarse dentro de este concepto; en general suele aplicarse el coste medio ponderado de los capitales permanentes de la empresa, aunque si éste es menor que el rendimiento de la mayor oportunidad de inversión alternativa se aplicaría este último. Otro grupo de costes derivados del almacenamiento incluye impuestos, seguros sobre los materiales y edificios, personal, depreciación, energía, deterioro de los items, pérdida y robo, etc. En conjunto, Cp puede llegar a significar un elevado porcentaje del valor de los bienes almacenados, *considerándose* en los distintos sistemas de gestión como *proporcional al nivel de inventarios.*

Coste de emisión, Ce: Este concepto agrupa todos aquellos costes que se producen cada vez y por el hecho de solicitar y recibir un pedido. Se incluyen, pues, el coste de preparar la documentación necesaria, recepción e inspección, manipulación y transporte, etc. Cuando se trata de pedidos que se elaboran en la propia empresa hay que incluir, además, la preparación de las máquinas, cambio de utillaje, etc. En este caso, Ce se denomina **coste de lanzamiento**. Este puede ser elevado y la tendencia actual es reducirlo mediante un adecuado análisis de las causas que lo originan; ello llevaría a una progresiva disminución del tamaño de los pedidos y a un aumento de su número (ver capítulos dedicados al J. I. T.). En general, *el coste de emisión suele considerarse independiente del tamaño de los lotes solicitados y proporcional al número de éstos*, aunque no siempre sea así.

Coste de ruptura, Cr: Se produce cuando se necesita un ítem y no hay existencias del mismo. En el caso de suministro interno deberán incluirse los costes derivados de paradas en los equipos por falta de material, incrementos de costes por aceleración del pedido no satisfecho (horas extras, subcontratación, etc.). La cifra total puede llegar a ser muy elevada. Cuando se trata de pedidos de clientes, pueden producirse pérdidas de ventas, incrementos de coste por aceleración del pedido, pérdida de imagen, etc. Este grupo de costes, Cr, es el de más *difícil evaluación*, debiendo la empresa conformarse muchas veces con estimar un rango entre cuyos límites se encuentra Cr, el cual *se considera proporcional a la demanda no satisfecha.*

Coste de adquisición, Ca: Es el relacionado con la compra (pedidos externos) o fabricación (pedidos internos) de los lotes solicitados. Suele ser considerado independiente del tamaño y número de éstos, pero no siempre será admisible dicha hipótesis (por ejemplo, descuentos por cantidad, disminución en el coste de elaboración de lotes de gran tamaño, etc.).

1.4.2.3. *El tiempo de suministro, TS*

Aunque son múltiples las definiciones referidas a este concepto (especialmente teniendo en cuenta que puede hablarse de diferentes tiempos de suministro), éstas pueden englobarse en un concepto básico: *intervalo de tiempo que transcurre entre el momento en que se solicita un pedido y el instante de su llegada*, entendida ésta como el momento *en que está disponible para ser utilizado*, tras la correspondiente inspección y almacenamiento en su caso (J. A. D. Machuca y otros, 1990, pág. 620).

Dicho concepto es aplicable tanto en el caso de materiales adquiridos en el exterior (*suministro externo*) como en el de obtención de los mismos dentro de la propia empresa (*suministro interno*), aunque la problemática planteada en uno y otro casos es diferente. *En el primer caso*, la empresa determina el TS en base al comportamiento del proveedor en el pasado, al plazo de entrega prometido por éste y al tiempo de seguridad que aquélla desea establecer. A partir de la emisión del pedido, la firma pierde el control, quedando el TS en manos del proveedor. Sin embargo, como veremos en los capítulos dedicados a planificación de materiales (Capitulos 4 a 10) y a gestión de stocks (Capítulo 13) la importancia de que se cumpla el TS así planificado es crítica; por ello, las empresas han de tomar medidas en relación con los proveedores, tales como: cuidar la selección, mejorar

la comunicación y el intercambio de información, primar las entregas a tiempo, contratar suministros por largos períodos o/y grandes cantidades, etc. Para una ampliación de estos aspectos nos remitimos a los capítulos mencionados.

A continuación vamos a abordar el **caso de suministro interno**, en el que el pedido solicitado es fabricado por la propia empresa. Si analizamos los tiempos consumidos desde que se detecta la necesidad de aquél hasta que está disponible, encontraremos los siguientes componentes[13] (Tersine, 1983, pág. 359):

- *Tiempo de confección del pedido*[14], o tiempo necesario para elaborar la documentación del mismo y enviarla al centro de trabajo (CT)[15]. Esta contendrá todas sus características, tales como ítem, tamaño, ruta, fechas previstas, materiales necesarios, etc.
- *Tiempo de desplazamiento o de transporte.* Este incluye, por un lado, el traslado de los materiales que requiere el pedido hasta el centro de trabajo y, por otro, el necesario para mover los inventarios en curso dentro del CT y el del envío al almacén del pedido finalizado.
- *Tiempo de cola*, mientras el pedido aguarda en el centro de trabajo hasta que se concluyan otros pedidos más prioritarios.
- *Tiempo de preparación* del CT para ejecutar el pedido.
- *Tiempo de ejecución* del pedido.
- *Tiempo de espera*, que transcurre desde que se han finalizado las operaciones hasta que el lote de pedido es trasladado al CT siguiente o al almacén.
- *Tiempo de inspección* consumido para realizar dicha actividad sobre el lote en cuestión.

De todos estos componentes, sólo los de preparación y ejecución representan *carga* en los centros de trabajo (necesidades de capacidad) y constituyen tiempos productivos. El resto (cola, espera, etc.) es tiempo improductivo y puede alcanzar hasta el 95 por 100 del TS, siendo el más importante el de *cola*, que puede llegar a representar el 80 por 100. Es evidente que estos valores no son aplicables a cualquier caso, dado que dichos porcentajes dependerán de diversas circunstancias, tales como el tipo de configuración productiva (normalmente, esos datos están referidos a configuraciones por lotes), la calidad de la planificación y control de la capacidad y de las operaciones, etc, como tendremos ocasión de comprobrar en capítulos posteriores. En cualquier caso, resulta evidente que deben realizarse importantes esfuerzos para reducirlos al mínimo (ver apartado 7.1). La tendencia actual es reducir los tiempos de suministro con objeto de: incrementar la rapidez de respuesta al mercado, disminuir los inventarios, etc. Dos vías fundamentales pueden ser (Ralston y Reddy, 1993) simplificar las listas de materiales (ver Apartado 4.4.2) y eliminar o reducir aquellos componentes del TS que no generen valor añadido (ver Capítulos 6 y 7).

De los párrafos anteriores puede deducirse que el conocimiento del TS es un elemento clave en el desarrollo de cualquier sistema de Planificación y Control de

[13] Algunos de estos componentes serán analizados en el Capítulo 7 (Apartado 7.1) cuando se estudie la reducción de los mismos.

[14] También denominado de papeleo, de preparación o de administración (ver, por ejemplo, Plossl (1983, pág. 117) o Browne y otros (1988, pág. 103)).

[15] Cuando no se haga mención expresa de otra cosa, a partir de aquí entenderemos por **Centro de Trabajo**, CT, una unidad productiva identificable que, en función del caso, podrá incluir una máquina, un conjunto de ellas, un taller, un conjunto de talleres o, incluso, una instalación completa. Su entidad dependerá del detalle requerido en el nivel de planificación, tal y como veremos posteriormente.

materiales, dado que va a ser un dato básico en múltiples fases del mismo, tanto en la planificación y programación de operaciones, como en la determinación de la capacidad necesaria[16]. Debido a ello debe determinarse lo más exactamente posible, lo cual no es un problema de fácil solución. Los tiempos de ejecución y preparación de un pedido son los que presentan menos complicaciones de cálculo, realizándose éste a partir de los tiempos de carga unitarios (ver Capítulo 2). El resto de los componentes de TS es variable y, como ya comentamos, representa un porcentaje importante del mismo, sobre todo en configuraciones por lotes. Debido a ello, mientras dichas circunstancias no cambien, se hace necesario trabajar con un valor medio del tiempo de suministro.

El TS medio al que hemos hecho referencia constituye el **TS planificado** *entre la emisión del pedido* y el momento de *recepción previsto.* En el cálculo del mismo debe pretenderse que éste coincida con el **TS real**, que mide el lapso de tiempo transcurrido entre la emisión y la *recepción real.* La opción más cómoda (y quizá la más empleada) es calcular un TS medio en base a datos históricos. Normalmente se empleará una media móvil o algún otro procedimiento dinámico, para ir incorporando las nuevas circunstancias de la fabricación. Hay autores (por ejemplo, Hoyt, 1983) que sugieren como TS el cociente entre la cola media del período de producción más reciente dividida por el *output* medio (ambos medidos en horas). No obstante, la información sobre el tiempo empleado desde la emisión a la recepción de un pedido, siempre será un dato conocido *a posteriori*, lo que facilitará el cálculo de cualquier tipo de media. Sin embargo, en muchas ocasiones, la mayor complejidad en el cálculo surge de otras cuestiones como, por ejemplo, los posibles intereses constrapuestos que pueden aparecer a la hora de decidir trabajar con un TS planificado más o menos largo (por ejemplo, Producción puede desear TS mayores para evitar la presión de marketing que, a su vez, desearía TS más cortos para satisfacer al cliente, etc.). En cualquier caso, no debe olvidarse que lo importante no es considerar los objetivos parciales, sino los globales de la firma (ver J. A. D. Machuca y otros, 1994, Capítulos 1 a 3).

Cualquiera que sea *el TS planificado*, está claro que *el TS real* que se produzca en la realidad *dependerá de dos cuestiones fundamentales*:

- *De los tiempos de cola* que sufra el pedido en cada uno de los CT por los que ha de pasar hasta que se realicen todas las operaciones necesarias para completarlo. Estos, a su vez, dependerán básicamente de la calidad de la planificación y control de la capacidad desarrollada para cada CT: si la carga es excesiva para la capacidad disponible, la cola será cada vez mayor, y viceversa (ver Cuadro 2.1 en el Capítulo 2).
- *Del control de prioridades* (ver Capítulo 9). Si la prioridad del pedido es mayor que la de otros que esperan en cola para ser procesados, éste se ejecutará y, por tanto, esperará menos tiempo.

Todo esto implica que el TS resultante se desviará del planificado o no, en función de cómo se gestionen las prioridades y la capacidad. *Si hay desviaciones entre el valor planificado y el real*, la solución no es simplemente aceptar pasivamente la realidad y cambiar el valor de este último, sino *estudiar las causas* de los tiempos reales e intentar *subsanar los problemas*, de forma que, por un lado, se eliminen las desviaciones y, por otro, se reduzca el valor de TS. Ello llevó a Plossl

[16] Si el tiempo de carga unitario permite determinar la carga generada por un pedido (capacidad necesaria para llevarlo a cabo, ver Capítulo 2), el tiempo de suministro permite repartirla en el tiempo.

(1983, pág. 121) a enunciar su autodenominada *«Ley de Plossl de los TS. Los TS serán los que digas que son, y sería mejor si dices que sean más cortos»*, nueva versión de lo que ya antes expuso con cierto sentido del humor: *«los TS son como las minifaldas: la mejor es la más corta»* (Plossl, 1973, pág 109). Esta actitud implicaría el establecimiento de un TS medio planificado lo más corto posible para después, hacer que se cumpla en la práctica. En cuanto a este TS medio para un artículo concreto, *j*, bastará sumar los tiempos adecuados de los elementos que lo componen; si el pedido implica *n* operaciones ($i = 1$ a n), que se desarrollan en *m* centros de trabajo ($k = 1$ a m), TS tomaría la forma:

$$\overline{\mathrm{TS}} = \overline{T} + \overline{T}_{mj} + \sum_{i=1}^{n} \overline{T}_i + \sum_{i=1}^{n} Co_i + \sum_{k=1}^{m} [Tc_{jk}/(E_k \cdot U_k)] + \sum_{i=1}^{n} \overline{TE}_i + \overline{TI}_j$$

donde:

- — $\overline{T}$ es el tiempo medio de confección de un pedido.
- — $\overline{T}_{mj}$ es el tiempo medio de desplazamiento de materiales desde el almacén al primer CT en que se hace una operación de *j*.
- — $\overline{T}_i$ es el tiempo medio de desplazamiento de materiales desde el CT donde se realiza la operación *i* al CT donde se desarrolla la siguiente operación.
- — Co_i es la cola objetivo del CT donde se desarrolla la operación *i*, expresado en horas reales.
- — Tc_{ik} es el tiempo de carga del lote medio a obtener de *j*, (ver Apartado 2.4 y Apéndice 2.A). Este se divide por los factores de eficiencia (*E*) y utilización (*U*) del CT, para convertirla en horas reales (ver Apartado 2.2.3).
- — $\overline{TE}_i$ es el tiempo de espera medio tras la realización de la operación *i* en su CT.
- — $\overline{TI}_j$ es el tiempo medio de inspección para un lote de *j*.

Por supuesto, en caso de que la realización de dos o más operaciones pudiera llevarse a cabo de manera simultánea, habría que tener en cuenta el solapamiento entre ellas. Una vez establecido este tiempo para cada ítem, sólo deberá rectificarse en caso de que se varíen los tiempos de cola objetivo o los diferentes procesos implicados (incluidos los de transporte, inspección, etc.). Si continuamente se dieran TS reales, superiores al planificado, sería necesario analizar el motivo e intentar reducirlos. En este sentido se podrían establecer múltiples opciones dirigidas a los diferentes componentes del TS[17]. Así pues, lograr los TS adecuados implicará una adecuada Planificación y Control de la Capacidad y una adecuada Programación de Operaciones (resultado del control de prioridades (ver Capítulo 9)).

Antes de terminar conviene comentar el concepto de **tiempo de suministro total**, también llamado **tiempo de suministro acumulado** o **tiempo de ciclo**, de un ítem final, el cual incluirá el tiempo acumulado necesario para adquirir todas las materias primas, fabricar las partes o componentes y montar el producto final. Sería, pues, la suma de los TS de los diversos componentes teniendo en cuenta los solapamientos entre los tiempos de obtención de los mismos (ver un ejemplo en el Capítulo 2, Apéndice 2.A).

[17] Ver, por ejemplo, el sistema SMED en el Capítulo 7 (Apartado 7.1) o Mather (1988, páginas 126 y ss).

1.4.3. Otros aspectos de interés en la planificación y control de materiales

1.4.3.1. *La ordenación de los items en función de su importancia relativa: Clasificación ABC*

Son muchas las empresas que almacenan miles o decenas de miles de artículos. Además es evidente que, en función de distintos posibles criterios, será distinta la importancia relativa de cada uno de ellos. Debido a lo anterior, puede ser conveniente realizar una ordenación de los mismos de acuerdo con algún criterio significativo. La más extendida es la **clasificación** ABC, que, para discriminar, emplea el **gasto** o **valor anual de los artículos**; éste no es más que la *utilización anual de los items medida en unidades monetarias.* Para calcularla (ver Tabla 1.1) se multiplica el valor unitario del artículo en cuestión por una previsión de su utilización para el año próximo (valor anual); hecho esto para todos los items, éstos se ordenan en una lista, de mayor a menor valor anual, y se numeran de 1 a *N*, siendo *N* el número de artículos diferentes. A continuación se va calculando el porcentaje que dichos valores anuales representan sobre la cifra de valor anual total y, seguidamente, el porcentaje acumulado desde 1 hasta N. En general, se observará que, por una parte, un escaso número (*grupo A*) de items del principio de la lista (10-20 por 100) representan un elevado porcentaje acumulado del valor anual (60-80 por 100), bien sea debido a un alto valor individual o/y a un elevado consumo anual. Por otra parte, un numeroso conjunto de artículos (50-60 por 100) al final de la lista (*grupo C*) significa un reducido porcentaje del valor anual acumulado (5-10 por 100). Por último, un número intermedio de productos (30-40 por 100) está asociado a un valor porcentual intermedio (20-30 por 100) y conforma el *grupo B*[18]. Si representásemos gráficamente los distintos artículos almacenados por una empresa, ordenados de acuerdo con el criterio mencionado, obtendríamos un gráfico análogo a los de la Figura 1.7.

Tabla 1.1. Ejemplo de clasificación ABC

Identificación	Número orden	% acumulado de productos	Valor unitario	Utilización anual	Valor anual	% valor total	% valor acumulado	Clasificación
01345	1	10 ┐ 20	(5.000) ×	(20) =	(100.000)	40,6 ┐ 73,08	40,6	
24362	2	20 ┘	20	4.000	80.000	32,48 ┘	73,08	A
14754	3	30 ┐	100	300	30.000	12,18 ┐	85,26	
22341	4	40 ├ 30	418	30	12.540	5,09 ├ 21,74	90,35	B
43427	5	50 ┘	110	100	11.000	4,47 ┘	94,82	
81923	6	60 ┐	86	110	9.460	3,84 ┐	98,66	
32504	7	70	50	32	1.600	0,65	99,31	
27692	8	80 ├ 50	300	3	900	0,37 ├ 5,18	99,68	C
81450	9	90	1.000	0,5	(500) :	(0,2)	99,88	
73247	10	100 ┘	100	3	300	0,12 ┘	100	
					(246.300) =			

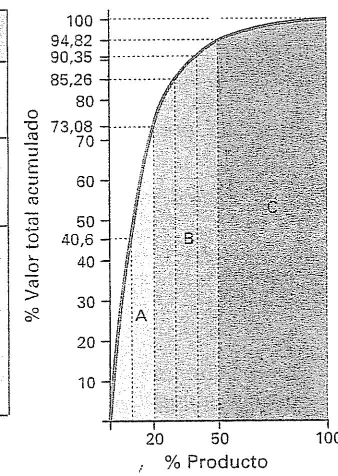


Figura 1.7. Gráfica de clasificación ABC de Tabla 1.1.

[18] Todos estos porcentajes son orientativos.

La clasificación ABC no debe tomarse como un criterio inflexible, sino como una primera aproximación a la ordenación de artículos de acuerdo con su importancia para la firma. Así, pueden existir artículos clasificados dentro del grupo C cuya carencia puede provocar enormes perjuicios para la empresa; en dicho caso, estos artículos deberían reclasificarse e introducirse dentro del grupo A.

Como veremos en el Capítulo 13, en el caso de la gestión clásica de inventarios, la aplicación individual de un modelo concreto a un ítem, o su consideración de forma más aproximada, puede hacerse depender de su adscripción a los grupos anteriormente mencionados. En métodos informatizados de planificación de materiales, tales como los sistemas M. R. P. (ver Capítulos 4 y 5), la atención puede extenderse a todos los artículos sin excepción aunque, si se juzga conveniente, los items adscritos al grupo C podrían ser objeto de un tratamiento más aproximado.

1.4.3.2. *La exactitud en los datos sobre inventarios: sistemas de control*

Como veremos a lo largo de diferentes capítulos de la presente sección, la exactitud de los datos de inventarios es de una importancia fundamental para la planificación de materiales. Sin embargo, dichos datos no coinciden con frecuencia con la realidad por múltiples razones (retiradas de material no autorizadas, movimientos de materiales anotados o anotaciones perdidas, retiradas de material anotadas y posteriormente canceladas, etc.). Ello puede provocar rupturas de stocks, cuando va a retirarse un material que no existe, o exceso de inventarios, cuando se solicita un lote de un ítem del que existe suficiente cantidad en almacén. Sin que ello implique un orden temporal, podemos decir que pueden llevarse a cabo diversas acciones para evitar en lo posible dichos problemas:

- Concienciar al personal relacionado con los movimientos de materiales de la importancia de llevar una estricta contabilidad de los mismos.
- Impedir que se retiren stocks sin la correspondiente autorización.
- Realizar controles de existencias con objeto de actualizar los datos, buscar las posibles causas de las desviaciones y realizar acciones correctoras.

En relación con este último aspecto, el sistema de control tradicional es el conocido **inventario anual**, que implica un recuento físico de todas las existencias una vez al año, normalmente a final del ejercicio o durante el período vacacional, en el que la actividad decae. Si bien este sistema está muy extendido, no es eficiente, pues el período entre revisiones es demasiado largo y, durante el mismo, no son tenidas en cuenta las posibles desviaciones, lo cual puede ser nefasto para la gestión de materiales. Una forma de paliar este defecto es llevar a cabo **inventarios** o **recuentos cíclicos** de distintos grupos de artículos, con una base periódica, que reduzcan el riesgo de inexactitud. El período entre revisiones puede ser variable para los distintos items en función de diversos posibles criterios. La clasificación ABC puede ser una guía, de forma que los períodos más cortos correspondan a los elementos del grupo A y los más largos a aquellos pertenecientes al grupo C. Además de esta pauta, puede realizarse un control de existencias de un ítem por diversas razones: cada vez que sus datos reflejen un nivel de disponibilidad nula no prevista, cuando no pueda servirse un pedido a pesar de que los datos indiquen disponibilidades, etc. Hoy día, con el desarrollo de medios informáticos, es cada vez más fácil acercarse a un **control continuo** gracias, por ejemplo, a los conocidos códigos de barras, que pueden aplicarse no sólo a los productos terminados, sino también a los componentes y partes.

1.5. LA IMPORTANCIA DE LAS PREVISIONES DE DEMANDA EN LA PLANIFICACION Y CONTROL DE PRODUCCION E INVENTARIOS

De los Apartados 1.3 y 1.4 se deduce fácilmente que las estimaciones de demanda constituyen una fuente imprescindible para la planificación de producción e inventarios. Así, en el **largo plazo**, las previsiones de demanda, junto con los objetivos estratégicos, permiten establecer los distintos planes que conforman el Plan de Empresa, de entre los cuales nos compete el Plan de Producción y Capacidad a Largo Plazo. Dichas previsiones deben abarcar el mismo horizonte temporal que el citado Plan de Empresa, estar cuantificadas en unidades muy agregadas y referirse a amplios períodos de tiempo (normalmente subdivididos en trimestres o años, aunque el primero de ellos puede periodificarse en meses).

Por lo que se refiere al **medio plazo**, las previsiones resultan vitales para la desagregación a realizar en la planificación táctica y establecer las necesidades de productos por meses (a veces trimestres) en unidades agregadas (familias de productos), éstos servirán como punto de partida para determinar el Plan Agregado de Producción. Por último, en el **corto plazo**, las previsiones de demanda se harán en unidades de productos y componentes concretos y con una periodicidad normalmente semanal.

De lo anterior se deriva que un adecuado sistema de previsión es condición necesaria para conseguir un correcto funcionamiento del proceso de planificación y control de las operaciones, pero, además, también resulta vital para el resto de las funciones empresariales. En ese sentido se pronuncian DeLurgio y Bhame (1991, pág. 8) cuando indican que «un buen sistema de previsión es esencial para lograr las metas estratégicas y operativas de cualquier organización. Las previsiones conducen los sistemas de información y control de marketing, finanzas y producción». A pesar de su importancia, debido a ser materia más propia de la investigación comercial, dejaremos todo lo relativo a las distintas técnicas de previsión a las obras dedicadas a dicha disciplina. Nos limitaremos aquí a realizar una serie de puntualizaciones que nos ayudarán, sin duda, a una mejor comprensión del proceso de planificación y control de producción e inventarios. En ese sentido, para lograr buenos resultados, un sistema de previsión ha de tener en cuenta una serie de consideraciones básicas, entre las que pueden destacarse (DeLurgio y Bhame, 1991, págs. 40 y 50):

a) **Debe haber consistencia**: Son varias las previsiones que afectan a los mismos productos durante el mismo horizonte temporal. Así, por ejemplo, tendremos previsiones a corto, medio y largo plazo para los próximos seis meses, pero con distinto nivel de agregación. La consistencia implica que la suma de unidades demandadas en dicho período debe ser la misma en los tres tipos de previsiones. Para conseguirlo existen dos caminos:

- *Desde abajo hacia arriba*, que implica establecer la demanda con un grado de concreción elevado y luego ir agregándolo en unidades superiores para los niveles más altos.
- *Desde arriba hacia abajo*, que comienza en familias, a partir de las cuales se desagrega hasta unidades de producto en los niveles más bajos. Para llevar a cabo este proceso suelen emplearse **relaciones de porcentaje**, basadas en datos históricos, y previsiones más concretas; dichos porcen-

tajes son indicativos del número de unidades de nivel inferior que se encuentran en la unidad de nivel superior.

Dada la estructura que hemos propuesto para el proceso de planificación y control, nos decantamos por esta última, pues pensamos que ello permitirá que se cumplan mejor los requisitos que entrañan las dos condiciones restantes.

b) **La agregación disminuye el grado de error.** Es un principio generalmente aceptado[19] que los errores de previsión de grupos agregados son menores que los de items concretos. De acuerdo con ello, se comenzaría por los valores agregados y se desagregaría posteriormente.

c) **Al aumentar la frecuencia de la periodificación se incrementa el error.** Quiere ello decir que, al igual que ocurría con las unidades empleadas para medir la cantidad, cuanto más pequeños sean los intervalos o cubos de tiempo en los que se subdivide el horizonte de planificación (mayor frecuencia), mayor será el error cometido. Por ejemplo, parece lógico pensar que las desviaciones positivas y negativas de 12 semanas tenderían a compensarse entre ellas y darían un menor error que una única previsión trimestral. Por supuesto que para que esto sea cierto es necesario que las previsiones no sean sesgadas, es decir, que los errores no sean siempre del mismo sentido, lo cual exigiría una corrección empleando técnicas adecuadas.

Para terminar diremos que a la hora de evaluar diferentes sistemas de previsión necesitaremos alguna medida de su eficacia. La vía más empleada es tener una medida del error en la previsión, o diferencia entre la demanda prevista y la real, a través de algún indicador significativo, como, por ejemplo (Adam y Ebert, 1992, pág. 83):

- La *desviación media absoluta (MAD: Mean absolute deviation)*, que se calcula como el sumatorio del valor absoluto de los errores de cada período dividido por el número de éstos que se evalúan.
- La *media de las desviaciones por período (Bias)*, menos empleada, que se calcula sumando dichas desviaciones (con su signo) y dividiéndolas por el número de períodos evaluados.

Gracias a este tipo de medidas podremos realizar, además, un adecuado control del sistema de previsión empleado. No debemos olvidar, sin embargo, que exactitud en la previsión y costes de la misma van unidos, por lo que sería necesario valorar el posible coste provocado por los errores encontrados con el derivado de su posible corrección.

1.6. BREVES COMENTARIOS SOBRE LA PLANIFICACION ESTRATEGICA DE LA PRODUCCION

La actividad de la Dirección de Operaciones es algo más amplia y compleja que el establecimiento del Plan de Producción a largo plazo, el cual no es sino el reflejo del proceso en que desemboca la Estrategia de Operaciones. Sin embargo, y dado que ésta fue tratada en el primer tomo de la presente obra (J. A. D. Ma-

[19] Ver, por ejemplo, Berry y otros (1983, pág. 10) o Starr (1989, pág. 538).

chuca y otros, 1994, Cap. 3), nos ceñiremos aquí a unos breves comentarios. Aunque algunos autores la definen como un plan de acción a largo plazo para la producción de los bienes y servicios de la corporación (Gaither, 1992, pág. 47) o como un «plan que describe el camino para producir y distribuir el producto» (Schmenner, 1979, pág. 126 y ss.), lo cierto es que dichas definiciones son incompletas; dejan fuera algo tan fundamental como es el explicitar la necesidad de que dicho camino contribuya al logro de la estrategia empresarial. En enfatizar este aspecto coincidimos con otros autores (por ejemplo, Hayes y Wheelwright, 1984, pág. 29); pero, además, queremos añadir otro importante factor, como es la distribución de recursos, que no debe perderse de vista dado que siempre serán escasos y, por tanto, determinantes de la **estrategia productiva**. De acuerdo con ello, podríamos definirla, de una forma más precisa, como un *plan a largo plazo para el subsistema de operaciones en el cual se recogen los objetivos a alcanzar, los cursos de acción y la asignación de recursos en los diferentes productos y funciones.* Todo ello debe perseguir el logro de los objetivos de la firma en el marco de su estrategia corporativa, debiendo, además, constituir un patrón consistente para el desarrollo de las decisiones tácticas y operativas del subsistema (J. A. D. Machuca y otros, 1994, Apartado 3.3).

Todo ello se traducirá en el establecimiento de un **Plan de Producción y de Capacidad a Largo Plazo.** Este debe recoger las necesidades de producto para hacer frente al Plan de Ventas en dicho horizonte temporal, así como reflejar la estrategia de operaciones desarrollada[20]. Ello implicará que el plan a largo plazo deberá:

- Tener en cuenta los productos actuales, así como los derivados de los planes de creación de nuevos productos o de modificación de los existentes, los cuales habrán de aparecer en el momento establecido en dichos planes y en las cantidades indicadas en el Plan de Ventas.
- Considerar las características del tipo de configuración del proceso productivo y las estrategias de inventario al periodificar las cifras de producción, sobre todo si el primer año del plan se utilizan meses o trimestres como unidades de tiempo.
- Tener en cuenta las disponibilidades de capacidad actuales, así como posibles variaciones (derivadas de la estrategia de operaciones por implantación de nuevas tecnologías o por ampliación o reducción de instalaciones).
- Contrastarse con los objetivos establecidos en la mencionada estrategia, de forma que se asegure la necesaria coherencia.

Con lo expuesto en el presente apartado hemos pretendido sintetizar la problemática de la Estrategia de Operaciones, así como el papel que juega en el proceso de planificación y control de la producción y en la planificación estratégica de la empresa.

1.7. CONSIDERACIONES FINALES

En el presente capítulo se ha realizado una breve introducción sobre el proceso de planificación y control de operaciones; con ello hemos intentado dejar clara la importancia del enfoque jerárquico que debe presidirlo, así como de la necesidad

[20] Ver J. A. D. Machuca y otros (1994, Apartado 3.6).

de integración funcional. La tremenda interacción existente entre las distintas fases y el papel crítico jugado por la capacidad en los distintos niveles es un hecho incontestable y crítico; éste debe estar siempre presente si se desea establecer planes factibles y acordes con los objetivos empresariales. De acuerdo con ello, debe evitarse algo que ocurre con frecuencia en la práctica: que el diseño del sistema de planificación y control surja como respuesta a problemas concretos y, por tanto, con escasa comprensión de la naturaleza interrelacionada del sistema total. Como resultado, éste es contemplado a menudo de forma fragmentada, tratándose como aspectos independientes que, en realidad, están interconectados y dando soluciones parciales que no resuelven los problemas planteados.

Así pues, lograr un buen diseño con un enfoque jerárquico e integrador para el sistema de planificación y control de producción nunca será un esfuerzo baldío. Sólo así habremos trazado el camino adecuado para obtener buenos planes que guíen hacia el logro de los objetivos de la organización. La problemática de la planificación y gestión de la capacidad en el contexto que nos ocupa será introducida en el Capítulo 2. En él abordaremos cuestiones fundamentales que nos ayudarán a analizar técnicas concretas de planificación de capacidad, las cuales se emplean en las disintas fases del proceso planificador que hemos descrito en el presente capítulo.

REFERENCIAS Y BIBLIOGRAFIA

ACKOFF, R. L.: «Un concepto de Planificación de Empresas», Limusa, 1972.

ADAM, E. E., y EBERT, R. J.: «Production and Operations Management. Concept, Models and Behavior», Prentice Hall, 1992.

ANTHONY, R. N.: «El Control de Gestión», Deusto, 1990.

AQUILANO, N. J., y CHASE, R. B.: «Fundamentals of Operations Management», Richard D. Irwin, 1991

BERRY y otros: «Master Production Scheduling. Principles and Practice», APICS, 1983.

BITRAN G. R., y otros: «Hierarchical Production Planning: a Two-Stage System», Operations Research, vol. 30, núm. 2, 1982.

BUENO, E.; CRUZ, I., y DURÁN, J. J.: «Economía de la Empresa. Análisis de las Decisiones Empresariales». Pirámide, Madrid, 1990.

CUERVO, J. A.: «La Planificación en el proceso de desición de la empresa», en Cuervo, Ortigueira y Suárez: «Lecturas de Introducción a la Economía de la Empresa». Pirámide, 1972.

DELURGIO, S. A., y BHAME, C. D.: «Forecasting Systems for Operations Management», Richard D. Irwin, Inc. 1991.

DILWORTH, J. B.: «Production and Operations Management. Manufacturing and Services», McGraw Hill, 1993.

ERSCHLER, J., y otros: «Consistency of the Dissagregation Process in Hierarchical Planning», Operations Research, vol. 34, núm. 3, 1986.

GAITHER, N.: «Production and Operations Management», The Dryden Press, 1992.

GELDERS, L. F., y VAN WASSENHOVE, L. N.: «Hierarchical Integration in Production Planning: Theory and Practice». *Journal of Operations Management*, vol. 3 núm. 1, 1982.

HAMPTON, D. R.: «Administración contemporánea», McGraw-Hill, 1983.

HAYES, R. W., y WHEELWRIGHT, S. C.: «Restoring Our Competitive Edge: Competing Through Manufacturing». John Wiley & Sons, 1984.

HEIZER, J., y RENDER, B.: «Production and Operations Management», Allyn and Bacon, 1991.

KOONTZ, O'DONELL y WEIHRICH: «Administración». McGraw-Hill, 1985.

KRAJEWSKI, L. J., y RITZMAN, L. P.: «Operations Management. Strategy and Analysis», Addison Wesley Publishing Co., 1990.

MACHUCA, J. A. D.; ALVAREZ, M. J.; GARCÍA, S.; DOMÍNGUEZ, M. A., y RUIZ, A.: «Dirección de la Producción: Aspectos estratégicos en la producción y en los servicios», McGraw-Hill, 1994.

MACKULAK, G. T., y otros: «Computerized Hierarchical Production Control in Steel Manufacturing», *International Jrl of Production Research*, núm. 18, 1980.

RALSTON, D., y REDDY, F.: «World Class Manufacturing Resources Planning», BPICS Control, agosto, 1993.

RENAU PIQUERAS, J. J.: «Administración de Empresas: una visión actual», Pirámide, 1985.

SCHMENNER, R. W.: «Look Beyond the Obvious in Plant Location», Harvard Business Review, enero-febrero 1979.

SCOTT, B.: «Manufacturing Planning Systems», McGraw-Hill, 1994.

STARR, M. K.: «Managing Production and Operations». Prentice Hall, 1989.

STEINER, G. A.: «Planificación de la Alta Dirección», tomo I, IESE, Ediciones Universidad de Navarra, 1979.

VOLLMANN, BERRY y WHYBARK: «Manufacturing Planning and Control Systems». Down Jones Irwin/APICS Series in Production Management, 1988.

VOLLMANN, BERRY y WHYBARK: «Sistemas de Planificación y Control de la Fabricación». Tecnologías de Gerencia y Producción, 1991.

CAPITULO 2

UNA INTRODUCCION A LA PLANIFICACION Y CONTROL DE LA CAPACIDAD

2.1. INTRODUCCION

«Una actividad crítica que ha de marchar en paralelo con el desarrollo de los planes de materiales es el desarrollo de los planes de capacidad. Sin la provisión adecuada de capacidad, o el reconocimiento de un exceso de la misma, los beneficios de un sistema de planificación y control de la producción, efectivo en otros aspectos, no pueden conseguirse plenamente» (Vollmann y otros, 1991, página 132). Efectivamente, la Capacidad, que se define como la *cantidad de producto o servicio que puede ser obtenido por una determinada unidad productiva durante un cierto período de tiempo* (J. A. D. Machuca y otros, 1994, Capítulo 7), debe adecuarse a la capacidad necesaria o **carga** en función de la demanda que la empresa desee satisfacer en el futuro, so pena de incurrir en nefastas consecuencias para la misma [1]. Ello lleva a la necesidad de afrontar la continua adecuación entre una y otra, objeto fundamental de la Planificación y Control de la Capacidad [2]. Esta implica una decisión inicial a largo plazo, así como la toma de decisiones sucesivas. Tanto la primera, como parte de las posteriores, hacen referencia a medidas encuadrables dentro de la Estrategia de Operaciones (ver J. A. D. Machuca y otros, Capítulo 7), las cuales llevan a la expansión o contracción de las instalaciones. Son medidas que afectan a la estructura productiva de la empresa (inversiones en nuevas instalaciones, cambios de tecnología, etc.) y que permiten adecuar la Capacidad a Largo Plazo. Corresponden, pues, al nivel de Planificación Estratégica.

No obstante, otra parte de las decisiones sucesivas de adecuación de la capacidad no puede resolverse con ese tipo de medidas y, aunque en esencia se dirigen al mismo problema, su contenido conlleva unas connotaciones bien diferentes. De ahí que en la estructura general del Sistema de Planificación y Control de la Producción, descrita en el Capítulo 1, la Planificación de la Capacidad apareciera también en los niveles de Planificación a Medio Plazo y Programa-

[1] Una capacidad insuficiente traerá, más tarde o más temprano, un aumento de los inventarios en curso y mayores cargas financieras derivadas del aumento del Fondo de Maniobra (ver Capítulo 1, Cuadro 1.1), un retraso de las fechas de entrega, las consiguientes pérdidas de ventas, el deterioro de la imagen de la empresa, etc. Por contra, un exceso de capacidad implicará costes de ociosidad y podrá provocar un aumento de stocks de productos finales si se gestiona la producción de forma tradicional (ver J. A. D. Machuca y otros, 1994, Capítulo 7).

[2] En inglés, el término más habitual empleado por los diferentes autores es el de *Capacity Planning and Control*, aunque algunos autores, como Wemmërlov (1994/1), emplean también la expresión *Capacity Management*.

ción. Para apreciar mejor la integración de todo el proceso de Planificación y Control de la Capacidad, vamos a apoyarnos en el gráfico de la Figura 2.1, el cual representa las fases ya expuestas en J. A. D. Machuca y otros (1994, Capítulo 7).

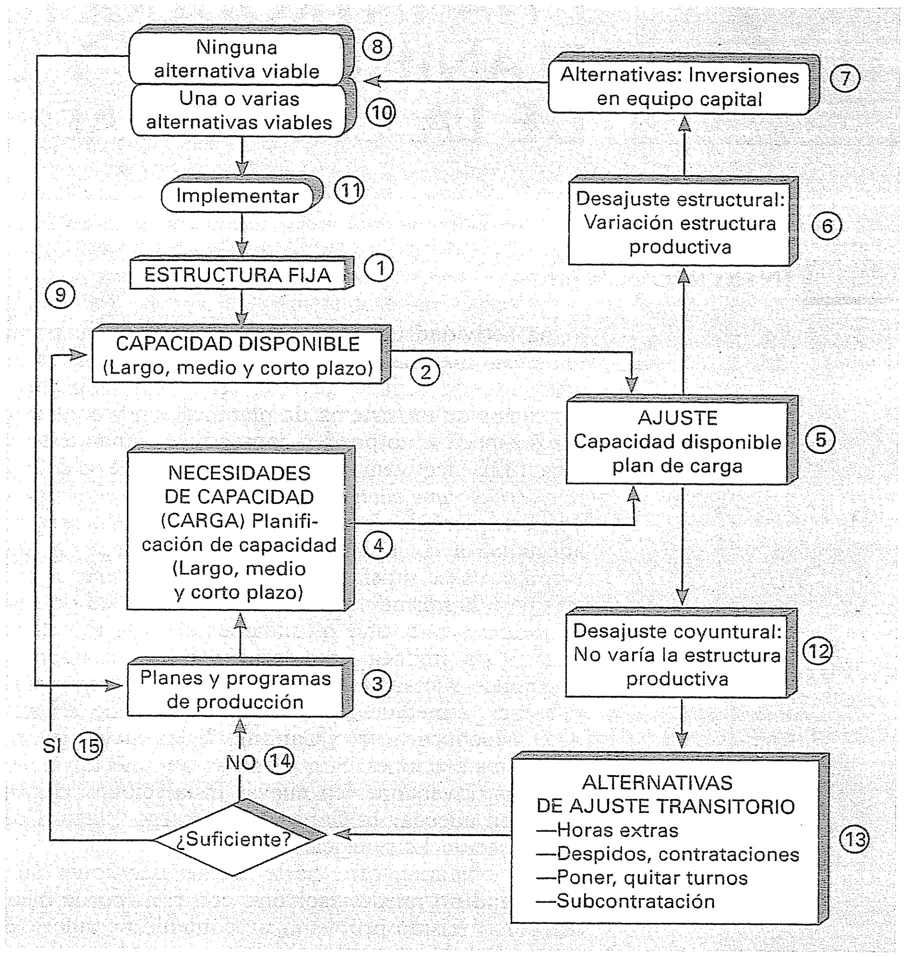


Figura 2.1. Proceso de Planificación y Control de la Capacidad.

Partimos de una cierta estructura fija (1), resultado de la decisión inicial de capacidad largo plazo. En base a ella, se estimaría la disponible en la actualidad, así como la proyección de la misma a largo plazo (2). Como ya indicamos, cada nivel de Planificación de la Producción requiere una contrastación de su viabilidad en términos de capacidad. La determinación de dichas **Necesidades de Capacidad** (4), o **Carga requerida** para llevar a la práctica cualquiera de los planes y programas (3), es el objeto de la **Planificación de la Capacidad**; ésta se traduce en los correspondientes Planes de Capacidad (que estrictamente deberían denominarse de Carga) a Largo, Medio, Corto o Muy Corto Plazo (en función del Plan de Producción de partida) (4).

Conocido el Plan de Carga, debe calcularse la divergencia entre éste y las Disponibilidades de Capacidad (5), observando las posibles alternativas que nos lleven a su eliminación. Si se trata del Plan de Carga elaborado para el Plan de Producción a Largo Plazo, las medidas a adoptar pueden ser diversas en función de las características del desajuste. En ocasiones éste tendrá carácter estructural (6) o, lo que es igual, se mantendrá en el tiempo como consecuencia de diversas posibles circunstancias (caída o crecimiento continuado de la demanda futura, estrategia de crecimiento, de penetración de mercado, etc.), que ponen de manifiesto una importante desviación de las necesidades de capacidad para desarrollar el Plan de Producción a Largo Plazo con respecto a la Disponibilidad Proyectada. En este caso, como ya mencionamos, sólo cabe acometer medidas que van a conllevar la realización de inversiones y la modificación de la estructura fija o de los diseños de los procesos (7). Tras determinar las alternativas posibles, se procederá a su evaluación[3], pudiendo ocurrir:

- Que ninguna resulte viable (8) (por ejemplo, por falta de recursos financieros para acometerlas, por falta de rentabilidad de la inversión, etc.). Ello implicaría modificar el Plan de Producción a Largo Plazo (9) y, por tanto, la Planificación Estratégica.
- Que una o varias alternativas resulten viables (10), lo que llevaría a seleccionar una, que, tras ser implementada (11), traería consigo un aumento de la Estructura Fija y de la Capacidad Disponible.

En otros casos, sin embargo, se tratará de una falta de capacidad transitoria o coyuntural (por ejemplo, subidas temporales de la demanda que no se van a mantener en el tiempo), la cual no justificará una variación de la estructura productiva ni la realización de inversiones (12). Tampoco en el caso de que el Plan de Capacidad corresponda a un Plan de Producción a Medio, Corto o Muy Corto Plazo, se justificarían medidas como las mencionadas, dado que el horizonte temporal no permite observar si los incrementos de demanda son suficientemente sostenidos en el tiempo. Además, en estos últimos casos, tampoco hay tiempo para llevar ese tipo de medidas a la práctica; las deficiencias o excesos de capacidad se van a producir en días, semanas o, como mucho, en meses, lo cual no es un período suficiente para, por ejemplo, construir o modificar una instalación. Ante este tipo de situaciones en las que la estructura productiva se considera fija no cabe más que usar medidas de ajuste transitorio (13), tales como la realización de horas extras, el uso de subcontratación o la contratación y despido de personal. Si estas medidas fueran insuficientes para eliminar la desviación, sería necesario modificar el Plan de Producción que les dio origen (14). Si fueron suficientes (15) se procederá a la evaluación, selección e implementación en su momento, logrando así aumentos o disminuciones transitorias de la Capacidad.

Así pues, la Planificación y Control de la Capacidad constituye un proceso único, compuesto de una serie de fases inseparables: las acciones a largo, medio, corto y muy corto plazo dependen las unas de las otras, así como de los diferentes niveles de Planificación y Control de la Producción. Por lo demás, y una vez encuadrada la Capacidad a Largo Plazo dentro del proceso de Planificación y Control de la Producción, vamos a dedicar el presente capítulo a los aspectos de ésta relativos al medio y corto plazo.

[3] Ver J. A. D. Machuca y otros (1994, Capítulo 7).

2.2. DETERMINACION DE LA CAPACIDAD DISPONIBLE

No es tarea fácil, sin duda, llegar a establecer una medida realista de la Capacidad Disponible. Esta puede ser medida del lado del *input* o del lado del *output* y, por desgracia, no puede decirse que exista una unidad universal (válida para la medición de la capacidad en cualquier caso), ni siquiera una norma genérica sobre ella (ver J. A. D. Machuca y otros, Capítulo 7). De otro lado, son múltiples los conceptos de capacidad que podrían emplearse para establecer la Capacidad Disponible y, cada uno de ellos llevaría a mediciones diferentes, con sus correspondientes ventajas e inconvenientes. Pasemos, pues, a analizar los diferentes elementos que nos llevarán a lograr una medición realista.

2.2.1. Problemática planteada por la unidad de medida

La elección de la unidad de medida a emplear para la Planificación y Control de la Capacidad puede llegar a constituir, en algunos casos, un problema bastante complicado, al verse afectado por múltiples circunstancias (por ejemplo, tipo de configuración y proceso productivo, número y variedad de productos, etc.). Realmente existen casos en que la elección de esta unidad cae por su peso, sobre todo en empresas que trabajan en configuración continua o repetitiva y están orientadas al producto. En estas circunstancias, donde una instalación fabrica siempre un mismo producto (o varios de características técnicas muy similares), puede establecerse una medida del lado del *output* (número de coches/semana, número de barriles de cerveza/semana, etc.), que, a pesar de ser simple, es representativa y define adecuadamente la capacidad. Ello permitiría, además, una comparación casi directa de la Disponibilidad de Capacidad y el Plan de Producción, pues ambos vendrían expresados en las mismas unidades.

En los casos de empresas que trabajan por funciones y con múltiples productos técnicamente diferenciados, la elección de una medida de la capacidad del lado del *output* se complica un poco más. Habrá ocasiones en que se pueda emplear una medida agregada como, por ejemplo, el número de muebles por semana o los metros de tela confeccionados al día. Dichas medidas recogen un mix de productos, tanto más difícil de determinar cuanto mayor sea su variedad y más factores comunes se empleen en su obtención. No obstante, y en última instancia, siempre queda la opción de su valoración en unidades monetarias (u.m. de producción o venta por semana). En todos estos casos, si se consideran los volúmenes de cada producto que pueden ser procesados en la instalación común durante un mismo período de tiempo, se puede llegar a una medida agregada de la capacidad del lado del *output*.

Aunque siempre es conveniente disponer de una unidad como la mencionada, sobre todo con propósitos de planificación de capacidad a largo plazo, puede que aquélla no sea suficiente para trabajar en horizontes de medio y corto plazo. Conviene, pues, conocer las condiciones que ha de cumplir una unidad de medida de la capacidad adecuada, la cual ha de ser:

- **Estable**, o lo que es igual, que no requiera continuas revisiones que puedan afectar a las disponibilidades y planes de capacidad. Tal suele ser el caso de las valoraciones en unidades monetarias del *mix* de productos, que suelen verse influidas por cambios en los precios de venta y costes de los factores.

- **Representativa del factor productivo** cuya capacidad se pretende medir, así como de los productos que incorpora. Imaginemos que el mix de productos empleado para la determinación de la unidad agregada es poco estable y que, por tanto, las proporciones de las cantidades que realmente se vayan a producir de cada uno pueden diferir mucho de las que componen el mix tomado como referencia. En ese caso, la unidad de medida de la capacidad disponible no servirá para medir, en su momento, la carga prevista. Ilustremos esta afirmación con el caso de una fábrica de cerveza que elabora cerveza negra y pilsen en barriles. Siempre que la proporción del mix se mantenga, el número de barriles que pueden producirse al año es una buena medida de la capacidad a largo plazo, incluso si la producción de una y otra requieren tiempos diferentes de la misma instalación. Supongamos que se pueden obtener 1.000 barriles/mes de cerveza negra o 1.500 barriles/mes de cerveza pilsen, y que la proporción de demanda suele ser de un 40 por 100 de la primera y 60 por 100 de la segunda; en ese caso, se puede decir que la capacidad es de 15.600 barriles/año [=(1.000 × 0,4 + 1.500 × 0,6) × 12]. Supongamos ahora que la producción planificada para el año es de 15.000 barriles; si la demanda cumple las proporciones del *mix* de referencia, se podrá decir que hay capacidad suficiente. Sin embargo, si la demanda real de cerveza negra fuera del 60 por 100 y la de pilsen del 40 por 100, serían necesarios 9 meses para fabricar los 9.000 barriles de la primera (0,6 × 15.000) y cuatro para los 6.000 de la segunda, por lo que necesitaríamos realmente un año de 13 meses. Lógicamente, cuanto mayor sea el número de productos que componen el *mix*, más complejo será el problema.
- **Adecuada a su objeto**, el cual es permitir el cálculo de la capacidad disponible y su comparación con la necesaria; esto tendrá traducciones diferentes en función del horizonte empleado. Para el caso de las empresas manufactureras donde se planifica a largo plazo para grandes unidades productivas (como instalaciones o factorías completas), y se usan unidades de producción agregadas (como los tipos de producto), el empleo de una unidad del lado del *output* es lo indicado. No ocurre igual cuando se trabaja a medio y corto plazo, donde las unidades productivas son menores (talleres, máquinas o centros de trabajo) y la producción se mide en productos concretos, componentes e incluso operaciones. En este caso, incluso si existe una medida representativa y estable del lado del *output*, ésta resultará posiblemente insuficiente para lograr el grado de precisión necesario en la medida de la capacidad[4]. No olvidemos que un CT puede intervenir en múltiples operaciones de cada uno de los productos (ver Apéndice 2.A); si unas y otros son numerosos, el mix de referencia será difícilmente representativo.

Las condiciones mencionadas también son válidas para **las empresas de servicios**. En algunos casos puede existir una medida clara y adecuada de capacidad como, por ejemplo, el número de lavados de coche/hora en una estación de lavado. En otros, sin embargo, una unidad que englobe todos los productos (por ejemplo, número de pacientes tratados al mes en un hospital o número de asiento-millas en una aerolínea) puede no ser suficiente para una planificación detallada a corto plazo. Así, por ejemplo, supongamos que, a nivel agregado, el

[4] Por ejemplo, el número de coches/semana es una medida adecuada para una instalación completa, pero puede que no lo sea para la sección de pintura si, por ejemplo, es necesario el doble de tiempo para pintar en metalizado que en colores lisos.

número de médicos del hospital es suficiente para atender a un cierto número de pacientes, medidos también de forma agregada. Si se desagregasen los médicos por especialidad y los pacientes por tipo de enfermedad, se comprobaría, posiblemente, que no se estaba en lo cierto (por ejemplo, demanda de operaciones cardiovasculares excesiva comparada con el número de especialistas disponibles). Del mismo modo, si en la compañía aérea no se distingue entre vuelos con *overbooking* habitual y vuelos con baja ocupación, más de un viajero no podrá tomar el vuelo deseado. En este tipo de empresas, el problema quizá se puede agravar, dado que el *output* no es almacenable, su variedad es grande y a veces ha de elaborarse en el lugar donde se encuentra el cliente.

De lo hasta aquí expuesto se comprende que, para la Planificación y Control de la Capacidad, sobre todo a medio y corto plazo, las empresas se decanten por medidas del lado del *input*, es decir, de los recursos clave empleados en la obtención de los diferentes productos o servicios, tales como las horas de mano de obra o de una máquina o centro de trabajo. Establecidas las disponibilidades en este tipo de unidades por período de tiempo, la conversión de los Planes de Producción en necesidades de estos recursos por período es más exacta, representativa y fiable, lo que permitirá una comparación más adecuada.

2.2.2. Factores clave en la elección de la unidad de medida

Una vez establecida la conveniencia de utilizar una medida de la capacidad del lado del *input*, es evidente que ésta dependerá de cuál sea el recurso cuya capacidad se vaya a planificar. En este sentido, y de forma tradicional, uno de los factores más controlados ha sido la mano de obra, por lo que la unidad de medida de la capacidad más empleada ha sido la hora de trabajo directo, es decir, una hora utilizada en producción y asignable a un trabajo concreto. Sin embargo, parece que, en la actualidad, la elección de la unidad de medida se ha visto complicada por una serie de circunstancias, de entre las que se destacan tres (Vollmann y otros, 1991, pág. 157):

- Una pérdida en la importancia relativa del trabajo directo con respecto a otros factores (ver J. A. D. Machuca y otros, 1994, Capítulo 10).
- La tendencia de muchas empresas a reducir el peso de la fabricación interna en sus procesos productivos mediante un aumento de los componentes adquiridos en el exterior.
- La tecnología del equipo capital empleado por muchas empresas productivas está sujeta a un cambio cada vez más rápido. La automatización de los procesos productivos (ibídem, Capítulos 10 y 11), abre cada vez más posibilidades al procesamiento automático de todo o parte de un producto, con mínima intervención de la mano de obra. Además, los equipos son cada vez más costosos.

Factores como los mencionados hacen que, hoy día, no pueda afirmarse que haya que centrarse precisamente en la mano de obra como el factor crítico cuya disponibilidad y necesidad hay que planificar. De otro lado, como podrá apreciarse en los epígrafes siguientes, dado el volumen de información a manejar y de cálculos a realizar, es muy difícil controlar y planificar la capacidad de todos los recursos para una planificación de capacidad pormenorizada, lo que obliga a limitarse a los más problemáticos. Debido a ello, para elegir una unidad de medida adecuada, la primera actividad a realizar será **identificar** dichos **recursos clave**. Si, en un caso concreto, el trabajo directo es el factor más restrictivo de la capacidad de la empresa, será la hora de trabajo directo la unidad a emplear; si lo es el equipo capital, será la hora de un centro de trabajo completo la unidad idónea.

Los recursos clave a tener en cuenta dependerán, pues, de cada caso concreto. No obstante, existen una serie de **criterios lógicos que pueden ayudar a seleccionarlos**. Así, entre otros, será necesario planificar detalladamente la capacidad para aquellos factores que:

- implican una gran inversión de capital (es fundamental su buen aprovechamiento para una buena productividad económica),
- nutren a otras instalaciones o centros,
- presentan normalmente grandes colas de espera (cuellos de botella),
- requieren largo tiempo para aumentar su capacidad,
- requieren mano de obra especializada con largos períodos de entrenamiento,
- requieren estabilidad en el empleo,
- etcétera.

Cuanto más fielmente cumpla estos requisitos un centro de trabajo, más importante será que su capacidad sea planificada y controlada en detalle.

Por supuesto que el emplear como unidad de medida la derivada del factor restrictivo clave no implica olvidarse de los demás. Así, por ejemplo, la capacidad planificada en horas de CT puede ser convertida en horas de trabajo directo. Para ello bastará establecer proporciones concretas entre horas de CT y horas de mano de obra directa. De esta forma, el proceso de planificación completo se desarrollaría para el factor clave; seguidamente, se partiría de dicha planificación para considerar el resto de factores a tener en cuenta. Procediendo así, se reduce y simplifica enormemente el esfuerzo de planificación.

2.2.3. Dos factores importantes en la medida de la capacidad disponible

De acuerdo con lo expuesto en el Apartado 2.2.2, lo normal es que la unidad empleada para medir la capacidad de una unidad productiva sea la hora de mano de obra o la de un centro de trabajo por unidad de tiempo. No obstante, y dado que la unidad en cuestión va a aplicarse a numerosas operaciones de múltiples ítems, se hace necesario realizar una serie de precisiones al objeto de llegar a una unidad de medida realmente homogénea y representativa de la Capacidad Disponible y de la Carga, al igual que ocurría con el estudio de tiempos (ver J. A. D. Machuca y otros, 1994, Capítulo 6).

2.2.3.1. *El factor de utilización,* U

Las horas disponibles durante una jornada de trabajo no se dedican todas a producir (necesidad de mantenimiento periódico de equipos, paradas por desayunos o aseo, absentismo, roturas de máquinas, etc.). Sin embargo, las horas disponibles, que deben compararse con las necesarias, son sólo las realmente productivas. Para tener en cuenta este hecho, se define el **factor de utilización** (U) como el cociente entre el número de horas productivas desarrolladas (NHP) y el de horas reales (NHR) de jornada por período. Es decir:

$$U = \text{NHP}/\text{NHR} \quad [1] \qquad \text{de donde:} \qquad \text{NHP} = \text{NHR} \times U \quad [2]$$

Así, si de la jornada de 8 horas de un día se pierden 0,8 horas por los citados motivos, el factor de utilización sería igual a (8 — 0,8)/8 = 0,9. Es decir, sólo el 90 por 100 de las horas reales de la jornada serían productivas. Es necesario, pues, establecer este factor para la unidad productiva cuya capacidad se quiere determinar. Si se trata de un centro de trabajo donde todos los trabajadores intervienen en una operación compuesta, es claro que U ha de ser medido para el CT en su conjunto. Si, por el contrario, cada trabajador actúa independientemente de los demás, realizando, por ejemplo, la misma operación en máquinas diferentes, U se obtendría para cada trabajador o para una muestra representativa, calculándose una media para el CT. Lo cierto es que, en uno u otro caso, puede acudirse a la observación directa, aunque siempre cabe la opción de determinar los tiempos desperdiciados a partir del análisis de los factores que los generan. Existen a este respecto diversas listas (por ejemplo, Hablewitz y otros, 1980, págs. 24 y 25) e, incluso, gran número de dichos factores pueden obtenerse en las listas utilizadas para la determinación del porcentaje de tiempos suplementarios en el cálculo de los tiempos tipo (ver J. A. D. Machuca y otros, 1994, Capítulo 6).

2.2.3.2. *El factor de eficiencia,* E

Otro importante hecho a considerar es que, indudablemente, los distintos conocimientos, habilidad y rapidez de movimientos de la mano de obra, pueden hacer que distintas personas desarrollen una misma labor empleando diferentes tiempos productivos, es decir, con distinta **eficiencia**. Así pues, si dicha actividad se repite, daría lugar a un número diferente de horas productivas en función de quién las ejecute; incluso para una misma persona, éstas pueden diferir a lo largo del tiempo debido al *efecto aprendizaje* (ver J. A. D. Machuca y otros, 1994, Capítulo 5). Por otra parte, un mismo trabajador, en diferentes operaciones de diversos productos, puede desarrollar distintas eficiencias, lo que hace que pueda llegar a ocurrir que ni siquiera sean comparables las correspondientes horas productivas. Debido a ello, dichas horas no serían una unidad adecuada que permitiese la medida y comparación de la capacidad disponible y de la necesaria para desarrollar el plan de producción. Necesitamos, pues, utilizar una **medida horaria homogénea**, basada en unos valores de U y E de referencia, al objeto de poder compararlas. *Dicha unidad se denomina* **hora estándar (h.e.)** *y supone un valor 1 para los factores de Eficiencia y Utilización.*

Para aclarar lo anterior diremos que, para reducir las horas productivas (a $U = 1$ y Eficiencia E_i, cualquiera) a h.e. (a $U = 1$ y Eficiencia = 1), bastará multiplicarlas por el **factor de eficiencia** (E), que sería igual al cociente entre el número de horas estándar (NHE) y el de horas productivas (NHP) desarrolladas en el mismo período. Este factor permite convertir la capacidad en horas productivas en capacidad en h.e. Es decir:

$$E = \frac{\text{NHE}}{\text{NHP}} \quad [3], \qquad \text{de donde:} \qquad \text{NHE} = \text{NHP} \times E \quad [4]$$

Ello implica, a su vez, que podemos traducir las horas reales de trabajo en h.e. Si en la expresión [4] sustituimos NHP por el valor que toma en la expresión [2] tendremos:

$$\text{NHE} = \text{NHP} \times E = \text{NHR} \times U \times E \qquad [5]$$

En cuanto a la determinación de E, puede realizarse en base a datos históricos de observaciones pasadas. Para ello, una vez calculado el tiempo de carga unitario que requiere la realización de una operación (ver Apéndice), bastará observar, para un CT, cuáles fueron las operaciones o items realizados y cuántas horas productivas empleó. Si, por ejemplo, el CT 123 desarrolló 100 veces la operación 1.024, que requiere 0,684 h.e. por unidad, empleando 72 horas productivas, la eficiencia obtenida fue de:

$$\frac{\text{Número unidades} \times \text{Tiempo carga unitario}}{\text{Tiempo productivo empleado}} = \frac{100 \times 0{,}684}{72} = 0{,}95$$

En el caso de un centro de trabajo donde cada trabajador actúa de forma independiente de los demás, realizando cada uno la misma operación en máquinas diferentes, es evidente que la E así obtenida será una media del conjunto. El problema podría estar en observar las horas productivas desarrolladas en ese período por todos los trabajadores del CT. Si son muchos, podría soslayarse el problema empleando el factor de utilización del CT (sólo habrían de considerarse las horas reales de jornada trabajadas). Por supuesto que esta forma de medir E requiere la determinación previa de los tiempos de carga unitarios (en horas estándar) que requiere cada operación de cada ítem en cada unidad productiva. No obstante, esto último es imprescindible para realizar la conversión exacta de las necesidades de producción en necesidades de capacidad, por lo que no significa un esfuerzo adicional.

2.2.4. La Capacidad Disponible

Una vez determinada la unidad de medida a emplear, y de cara a la determinación de la viabilidad de los planes de producción, sería preciso llegar a establecer la Capacidad Disponible para el horizonte de planificación considerado. A este respecto, nos movemos en un complejo entramado de posibles conceptos de capacidad que conviene deslindar. En principio es obvio que, si las decisiones de capacidad tomadas a largo plazo fueron adecuadas, el tamaño de la estructura fija (ver J. A. D. Machuca y otros, 1994, Capítulo 7) debió establecerse para dar respuesta a las necesidades de demanda en las condiciones más favorables. Dicha estructura permitiría la obtención de un volumen de producción denominado **Capacidad Diseñada**, la cual podría definirse como *el volumen de* output *objetivo para el cual fue diseñada* (Meredith, 1992, pág. 176). No obstante, una cuestión es el volumen que teóricamente debería obtenerse y otra el que realmente puede conseguirse en la práctica; de hecho, dicha capacidad sería el «output *máximo bajo condiciones ideales*» (Waters, 1991, pág. 278), las cuales se producirán o no en la práctica. Sólo si las condiciones reales coincidiesen con las ideales empleadas en la determinación de la Capacidad Diseñada, podría ésta considerarse como medida de la Capacidad Disponible.

Sin embargo, como ya hemos analizado en el Apartado 2.2.3, la utilización y la eficiencia de las instalaciones no serán del 100 por 100. Por este motivo, el ***Output*** **Real** o *volumen de* output *realmente logrado* (Stevenson, 1990, pág. 307) sería menor que la capacidad diseñada e igual a ésta multiplicada por E y por U. Tampoco el *Output* Real así definido proporcionaría una medida adecuada de la Capacidad Disponible. Cuando se estableció la Capacidad Diseñada, se hizo para unas ciertas condiciones de producción, es decir, para un cierto número de turnos

de trabajo por jornada, de horas por turno, de jornadas por semana, etc. Pero lo cierto es que éstas pueden cambiar con el tiempo debido a diversas causas: aumentos importantes de demanda (que puede llevar a aumentar el número de turnos), conquistas sindicales (por ejemplo: descansos de sábados, reducciones de jornada laboral), etc. Tampoco el número de trabajadores empleados ha de ser siempre el mismo (ver Capítulo 3) y ello puede traer un aumento o disminución de las horas disponibles en un cierto centro de trabajo.

Todo ello hace que la Capacidad Disponible a establecer para la Planificación y Control de la Capacidad a Medio y Corto Plazo, se calcule para unas ciertas **condiciones normales de producción**, que tengan en cuenta todas las circunstancias citadas (número de turnos por jornada, horas por turno, jornadas por semana, trabajadores por turno, etc.). Una vez establecidas éstas para el horizonte de planificación considerado, la **Capacidad Disponible** deberá reflejar el *volumen de* output *que podría ser logrado por período de tiempo en las circunstancias normales de producción (VOCNP en horas reales), para la eficiencia (E) y utilización (U) reales del factor considerado*. Así pues, midiéndola del lado del *input*, la Capacidad Disponible sería igual al producto VOCNP (en horas reales) $\times E \times U$, obteniéndose el resultado en horas estándar (ver expresión [5] en el Apartado 2.2.3). Por ejemplo, supuestos dos turnos de trabajo diario en un CT, de 8 horas cada uno, durante 5 días a la semana, con un factor de utilización 0,9 y un factor de eficiencia 0,95, la Capacidad Disponible (CD) sería:

$$CD = 2 \text{ turnos} \times 8 \text{ horas} \times 5 \text{ días} \times 0{,}9 \times 0{,}95 = 68{,}4 \text{ h.e. por semana}$$

Horas reales por semana

Horas productivas por semana

Horas estándar por semana

Esta medición de la Capacidad Disponible, en horas estándar, permite una comparación más exacta y homogénea con la Carga Planificada para los casos más complejos de Planificación y Control de la Producción. Sin embargo, conviene resaltar que dicha medida de la Capacidad Disponible a medio y corto plazo no debe tomarse como inamovible, pues siempre caben medidas transitorias de aumento o disminución de la capacidad (ver Apartado 2.6). Todas ellas implicarían trabajar con aumentos del coste unitario de producción (piénsese, por ejemplo, en el incremento de coste que conllevan las horas extras, la subcontratación, etcétera.), por lo que, en principio, a la empresa le interesa ajustarse a la Capacidad Disponible calculada para las circunstancias normales de producción. Esto no quiere decir que si la Carga Planificada en un período, para hacer frente a un determinado Plan de Producción, fuera superior a la correspondiente Capacidad Disponible, aquél deba ser rechazado. En este sentido, siempre que económicamente convenga, será mejor obtener un beneficio un poco menor en un determinado volumen de producto que no producirlo y no obtener nada.

De cara a la posterior comparación con la Carga Planificada y a la determinación de la viabilidad del Plan de Producción se hace necesario, pues, disponer de una medida de la **Capacidad Máxima** que estaría disponible en un período determinado. No obstante, es necesario realizar algunas precisiones sobre lo que queremos reflejar con este nuevo concepto, el cual, normalmente, es entendido como el volumen de *output* que la unidad productiva podría obtener operando

durante 24 horas al día, siete días a la semana (Wemmerlöv, 1984/1, pág 6). Sin embargo, no cabe duda de que, como el mismo autor reconoce, no es un concepto muy útil, ya que las condiciones mencionadas no van a darse en la práctica. No es éste, por tanto, el concepto de Capacidad Máxima que nos interesa, sino aquel que la contempla como *la que se podría lograr en las circunstancias normales de producción más la derivada del uso de todas las posibles medidas de aumento transitorio*. Para distinguirla de la que antes hemos denominado Capacidad Máxima, algunos autores la denominan **Capacidad Pico**[5]. No obstante, éste es un volumen de capacidad que puede obtenerse puntualmente, pero que no puede sostenerse en el tiempo: por ejemplo, largos períodos de horas extras no suelen ser admitidos por los trabajadores, producen fatiga y, por tanto, baja productividad; también la contratación temporal, si es masiva, traerá consigo descensos de productividad. Todo ello, además, puede hacer subir enormemente los costes de fabricación, por lo que *cuando opera en Capacidad Pico, una firma puede producir mínimos beneficios o igualmente perder dinero...* (Krajewski-Ritzman, 1990, pág. 230).

Debido a lo anterior, la Capacidad Pico debe ser únicamente un dato de referencia que, sólo en circunstancias especiales, debería ser alcanzado, debiendo procurarse no sobrepasar nunca la denominada **Capacidad Práctica Máxima**[6]. Esta sería «el *output alcanzado dentro del programa de operaciones normal de turnos por día y días por semana, mientras las instalaciones presentan altos costes de ineficiencia*». Es evidente que esta forma de determinar la Capacidad Disponible a corto y medio plazo, presenta dificultades para ser desarrollada en la práctica, máxime cuando se requiere un continuo proceso de ajuste de los elementos que en ella intervienen (ver apartado siguiente). A veces, para evitar esta complejidad, cabe la opción de emplear como medida de la Capacidad Disponible la denominada **Capacidad Demostrada**, que es una media del *output* obtenido por período en el pasado, medido en horas estándar. Esto, sin embargo, no es correcto en muchos casos porque *la capacidad histórica puede no haber sido obtenida bajo las mejores condiciones o la más alta eficiencia. El uso de la Capacidad Demostrada puede entonces perpetuar una situación por debajo de la ideal* (Wemmerlöv, 1984/1, pág. 7). A ello habría que sumar diversos hechos posibles:

- Las condiciones normales de producción en los períodos en que se midió la Capacidad Demostrada no tienen por qué coincidir con las planificadas para el futuro.
- El CT afectado quizá tuviera poco uso porque se fabricaron pocas unidades de los items concretos en que más interviene, lo que llevaría a perpetuar una baja utilización del mismo, incluso cuando alteraciones de la demanda requieran fabricar más cantidad de los items en cuestión.
- En ocasiones, una mala programación puede hacer que un centro de trabajo se quede parado en espera de la llegada de un lote procedente de otro CT; o quizá hubo un fallo en el aprovisionamiento. La Capacidad no se usó, pero estuvo disponible.

En definitiva, la Capacidad Demostrada no es realmente una medida de la Capacidad Disponible, sino de la parte de ésta que se empleó en el pasado.

[5] Ver, por ejemplo, Krajewski-Ritzman [1990, pág. 230].

[6] Término definido por el Bureau of Economic Analysis y Aceptado por la Federal Reserve Board U. S. (Gaither, 1992, pág. 247).

2.2.5. El control de la Capacidad Disponible

Una vez determinada la Capacidad Disponible para los períodos de tiempo futuros con una unidad de medida adecuada, es evidente que el valor estimado constituye sólo **Capacidad Disponible Planificada**; en la práctica, la capacidad real puede desviarse con respecto a aquélla, debiendo procurar que dichas desviaciones sean mínimas. La adecuación entre ambas va a depender de la divergencia que se produzca entre:

- Las condiciones normales de producción planificadas y las que luego se den en la práctica.
- La utilización real respecto de la empleada para determinar la Capacidad Disponible Planificada: pueden variar con el tiempo el número de averías de las máquinas o sus necesidades de mantenimiento, las condiciones de trabajo, etc., por lo que el factor U no tiene por qué mantenerse estable.
- La eficiencia real y la empleada para calcular la Capacidad Disponible Planificada: las rotaciones de personal, las sustituciones por jubilación o baja voluntaria, las contrataciones y despidos, o el simple envejecimiento de la plantilla, por ejemplo, son factores que pueden hacer cambiar la eficiencia de un CT que, por tanto, tampoco permanecerá estable en el tiempo.

Se hace, pues, necesario mantener un control continuado, sobre todo para los dos últimos elementos, al objeto de trabajar con suficiente confianza en las estimaciones de la Capacidad Disponible Planificada. La técnica de Control *Input/Output* (analizada en el Capítulo 9), realiza una comparación retrospectiva entre los valores planificados y reales de la Capacidad Disponible y de la Carga para varias semanas. Establece así las divergencias entre la Cola de Espera real y la planificada y prevé su evolución en las próximas semanas. Si ésta resulta similar para ambas colas o, si habiendo divergencias, la Capacidad Disponible Planificada y real fueran iguales (la desviación se debería entonces a defectos en la planificación de la carga), el sistema estará funcionando[7]. En caso contrario, se hace necesario ajustar, como mínimo, los valores de E y U empleados, dado que la proporción de desviación entre la capacidad planificada y la real vendrá dada por:

$$\frac{\text{Capacidad Planificada}}{\text{Capacidad real}} =$$

$$= \frac{\text{Horas reales planificadas}}{\text{Horas reales desarrolladas}} \times \frac{E \text{ planificada}}{E \text{ real}} \times \frac{U \text{ planificada}}{U \text{ real}}$$

Para conseguirlo, algunas empresas calculan lo que suele denominarse **Eficiencia Ajustada**[8]. Para ello, cada cierto período de tiempo (menor cuanto mayor variabilidad pueda tener la Eficiencia), se calculan las horas productivas desarrolladas y se comparan con el número de h.e. equivalentes. Así, si en el ejemplo del Apartado 2.2.3.2, semanas después el mismo CT desarrolló, en 70 horas productivas, 50 veces una operación que requiere 1,288 h.e. por unidad, la E lograda sería de 0,92 (= 50 × 1,288/70) en lugar del 0,95 previsto. Si tras varias mediciones se sigue apreciando una desviación importante, se calculará una nueva Eficiencia Ajustada, que será una **media móvil**[9]. Otros autores (por ejemplo, Starr, 1989, página 220) proponen también el uso de las Curvas de Aprendizaje que ya comentamos en el Apartado 2.2.3.2; ello podría simplificar (quizá a costa de la exactitud) el proceso de seguimiento de la Eficiencia.

[7] Excepto en el caso particular en que los errores en la Carga Planificada compensen los de la Capacidad Planificada.

[8] Ver, por ejemplo, el caso de la Motter Printing Co. descrito por Wemmerlöv (1984/2, pág. 13).

No obstante, no es la E el único elemento a ajustar. Sería conveniente seguir un procedimiento similar para el factor de utilización. Una medida podría ser el cociente entre las horas productivas (ya utilizadas para el caso anterior) y las horas reales que se han desarrollado. Incluso, si comparamos éstas con las horas reales para las condiciones normales de producción planificadas, nos daría la desviación proporcional producida a causa del tercero de los elementos mencionados al principio de este apartado, poniéndonos sobreaviso de las deficiencias en la gestión. Todo esto implicará, desde luego, un esfuerzo importante. En ocasiones, la E y U de un CT serán muy estables (sobre todo en procesos muy automatizados) y las actualizaciones tendrán que ser poco frecuentes. En otros casos no ocurrirá así y una buena gestión requerirá un mayor esfuerzo, que merecerá la pena o no en función del coste que conlleve y de las ventajas que reporte. El Control *Input/Output*, la evolución de las Colas de Espera, el cumplimiento de los Tiempos de Suministro, etc., serán elementos que pondrán sobreaviso de que es necesario ajustar los elementos empleados en el cálculo de la Capacidad Disponible Planificada.

2.3. DETERMINACION DE LAS NECESIDADES DE CAPACIDAD: NIVELES Y TECNICAS

Como ya mencionamos en la Introducción, la segunda de las fases de la Planificación y Control de la Capacidad consiste en hacer una estimación de la Capacidad Necesaria para el horizonte temporal elegido, el cual puede ser el largo, el medio, el corto o el muy corto plazo. Ello es debido a que las actividades de Planificación de la Capacidad se desarrollan paralelamente a las del Plan de Producción con ella relacionado. Así pues, obviando el largo plazo (analizado en J. A. D. Machuca y otros, 1994, Capítulo 7), nos encontramos, en el medio plazo (ver Figura 2.2.) con la **Planificación de Necesidades de Recursos** (*Resource Requirements Planning = RRP*) o **Planificación Agregada de Capacidad**, cuyo objeto es determinar las necesidades de capacidad para desarrollar el Plan Agregado de Producción. Su comparación con la capacidad disponible estimada ayudará a determinar las posibles sobrecargas o subcargas, cuyo conocimiento permitirá, en su caso, adaptar la planificación.

RRP no es en sí una técnica, sino la actividad de planificación que se desarrolla para conectar el plan de producción a medio plazo con la realidad de la capacidad, por lo que sus características básicas (agregación de unidades, horizonte temporal, periodificación, etc.), se ajustan a las del Plan Agregado de Producción (ver Capítulo 3). Las técnicas a emplear son las mismas que para el nivel siguiente, aunque con mayor grado de agregación, pues se trabaja con unidades de familias de productos (en vez de en productos concretos como en el Programa Maestro de Producción), se utilizan períodos mensuales o trimestrales

[9] Esta minimizará, además, el efecto de los tiempos de preparación incluidos en los tiempos de carga unitarios de las operaciones y la variabilidad de los tamaños de lote, a lo cual haremos referencia en apartados posteriores.

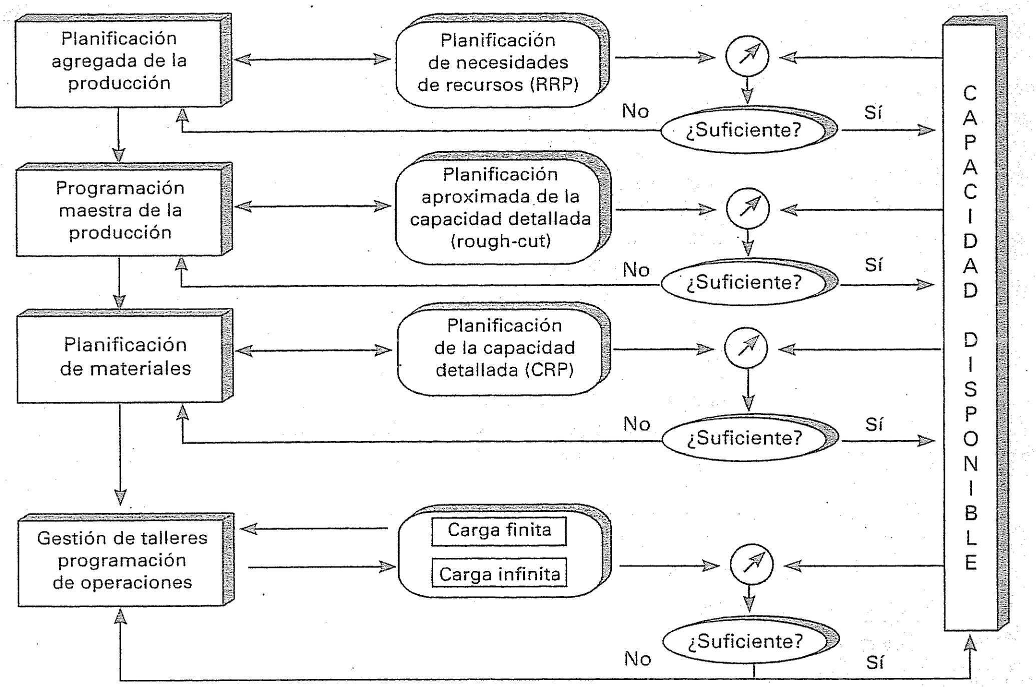


Figura 2.2. Niveles de Planificación de Capacidad.

(en vez de semanas) y se abarcan grandes unidades productivas (como instalaciones o grupos de centros de trabajo o talleres).

La segunda fase es la **Planificación Aproximada de la Capacidad** (*Rough-Cut Capacity Planning*) que, como su propio nombre indica, proporciona una primera visión aproximada de cuáles serían las necesidades de ciertos recursos clave si se ejecutara el Programa Maestro de Producción tal y como está concebido en ese momento (ver Capítulo 3). Dicho programa marca las características básicas del Plan Aproximado de Capacidad, que es establecido para un plazo de entre tres meses y un año y en el que se suele trabajar con unidades de producto por semana en unidades productivas concretas, tales como un taller, un centro de trabajo o, incluso, un pequeño grupo de máquinas. No obstante, en el caso de no disponer de un proceso informatizado o de no contar con la información precisa, podría trabajarse con una periodificación mensual. Esta podría bastar para los propósitos de este nivel de planificación, reduciendo bastante el proceso de cálculo. A través de técnicas como las Listas de Capacidad (*Capacity bills*), los Perfiles de Recursos (*Resource Profiles*), o la Planificación de Capacidad usando Recursos Agregados (*Capacity Planning Using Overall Factors*), se puede llegar a establecer las necesidades por período para ese Programa.

De entre las tres técnicas mencionadas, la menos detallada y la que menos información requiere es la última, *Planificación de Recursos Agregados*, que, como su nombre indica, trabaja con valores de capacidad agregados. El proceso consiste en determinar las horas de carga derivadas de un Programa Maestro o, en su caso, de un Plan Agregado y, luego, distribuirlas entre las unidades productivas en base a la carga que éstas tuvieron el año anterior. Ello implica suponer que en el futuro se van a repetir las mismas proporciones en la fabricación de los productos o de las familias a fabricar, lo cual es más fácil que se produzca en este último caso al ser unidades más agregadas. Este hecho las hace más indicadas en el caso de RRP que en el de la Planificación Aproximada.

La técnica más detallada es la de los *Perfiles de recursos*, que también presenta mayor complejidad en los cálculos que las Listas de Capacidad. En realidad, lo único que aporta sobre esta última es la periodificación o distribución en el tiempo de las cargas estimadas para los centros de trabajo. Las *Listas de Capacidad*, sin embargo, asignan toda la Carga generada por un lote al período en que éste ha de entregarse, lo cual es incorrecto, pues pueden mediar varias semanas desde que empieza a fabricarse un lote hasta que se entrega. Esta ventaja, sin embargo, puede no ser tal en la práctica, dado que las técnicas de dimensionado del lote de pedido pueden hacer variar sobremanera la periodificación de cargas (ver Capítulo 4). Esto podría provocar que no fuese válida la distribución realizada con los Perfiles de Recursos. De otro lado, la información que proporciona la Lista de Capacidad es suficiente al objeto de la Planificación Aproximada que se pretende a este nivel; además, algunos de sus inconvenientes se pueden paliar con una adecuada interpretación de los resultados que proporciona.

El siguiente paso es la **Planificación de Capacidad Detallada**, que se realiza para el programa de componentes mediante la técnica de *Planificación de Necesidades de Capacidad* (*Capacity Requirements Planning*, *CRP*). El horizonte temporal es similar al del Programa Maestro de Producción, sobre todo en entornos MRP. El nivel de detalle es bastante alto, partiendo de componentes de fabricación (no de productos finales) para pequeñas unidades productivas (incluso una máquina concreta si fuera necesario). Por supuesto es necesario conocer los pedidos planificados (ver Capítulo 4), que son su punto de partida. Esta técnica es capaz de determinar, período a período (normalmente semana a semana), las cantidades necesarias de cada recurso para hacer frente al plan de materiales. Como en los otros niveles, la comparación de las necesidades con las disponibilidades permitirá establecer las sobrecargas o subcargas y las medidas correctoras, así como, llegado el caso, modificar el Plan de Materiales hasta que sea factible. Dado el alto volumen de documentación que genera esta técnica y la cantidad de cálculos a realizar cuando el número de productos o/y de componentes y la complejidad de los primeros es grande, es preciso que previamente se haya realizado la Planificación *Rough-Cut*, al objeto de que no sean necesarias muchas simulaciones con CRP. Dependiendo del caso (como luego veremos), CRP y *Rough-Cut* no son excluyentes, sino que en muchos casos se complementan.

A un nivel de mayor detalle se emplearían **las técnicas de Carga Finita o de Carga Infinita**. Ambas actúan en el muy corto plazo (varios días a varias semanas) y se solapan con la Gestión de Talleres (ver Capítulo 9). De hecho, realmente lo que se está haciendo en ambos casos es programar las operaciones; lo que ocurre es que, en las segundas, se planifica simultáneamente la capacidad.

Respecto a las **técnicas de Carga Finita**, aunque parten del Plan de Materiales, deben considerarse más una técnica para la Programación de Operaciones que una técnica de Planificación de Capacidad. Ello se debe a que es más bien un método para programar órdenes de trabajo, asignándolas a las diferentes unidades productivas (por orden de prioridad y por período de tiempo) hasta que la capacidad disponible quede cubierta, se cumpla o no el Plan de Pedidos. Como

expresan Plossl y Wight (1973, págs. 32 y ss), «ciertamente la asignación a carga finita no muestra la capacidad necesaria». En este sentido se expresan otros muchos autores[10].

Las mal denominadas **Técnicas a Capacidad Infinita**, también están enfocadas a la Programación de Operaciones, pero en realidad actúan con Capacidad Flexible. Programan las operaciones en los centros de trabajo con el objeto de cumplir las fechas de entrega del Plan de Materiales, el cual debe haber sido validado en términos de capacidad por CRP, por lo que se actúa con capacidad flexible y no infinita. En base a las prioridades existentes entre aquéllos, se establecen los momentos en que han de entrar y salir de los CT, para lo que, previamente, se determina la capacidad necesaria en cada uno de ellos. De esta forma, para varios días (normalmente a lo sumo una semana), se calcula cuál es la capacidad que se necesita en cada CT para cumplir el Programa de Operaciones. Esta es la forma de actuar de la técnica denominada **Listas de Expedición** o del **Gráfico de Gantt**. Ambas serán tratadas en más profundidad, junto con la problemática Capacidad Finita/Infinita y la Secuenciación, en el Capítulo 9, dedicado a la Programación de Operaciones a muy corto plazo.

Como se deriva de lo expuesto anteriormente, el grado de detalle con el que se han de establecer las necesidades de capacidad es diferente en cada uno de los niveles contemplados, siendo más específico a medida que se baja en la escala. Por otra parte, en la Figura 2.2, las conexiones de la Planificación de Capacidad con la Planificación de la Producción en los diferentes niveles se han representado con flechas de doble sentido. Esto pretende indicar la correspondencia que debe existir entre capacidad requerida y disponible, así como para dejar claro el concepto de **Bucle Cerrado** (*Closed Loop*) en la Gestión de Capacidad. Si hay que disminuir la carga o aumentar la capacidad en caso de divergencias entre ambas, eso es algo que quedará a juicio de la Dirección. De otro lado, con el cierre del bucle, se pretende que la información derivada de la ejecución de los planes sirva de retroalimentación a los diversos niveles de planificación, con vistas a revisarlos y a eliminar las desviaciones surgidas en las correspondientes replanificaciones.

Llegados aquí, el siguiente paso consistiría en analizar una a una las técnicas mencionadas. Sin embargo, al no haber sido analizados los planes de producción con los que se relacionan, se hace difícil la comprensión de su mecánica y el papel que juegan en cada caso. Por este motivo, estudiaremos cada una de ellas en el contexto en que toman sentido. Así, las técnicas CPOF, Listas de Capacidad y Perfiles de Recursos, serán analizadas en el capítulo dedicado a Planificación Agregada y Programación Maestra. La técnica CRP se estudiará en los dedicados a MRP, tras haber analizado la obtención del Plan de Materiales y, por último, como ya dijimos, la problemática de la Carga Finita/Infinita se analizará en el capítulo dedicado a la Programación de Operaciones a muy corto plazo. No obstante, hay *aspectos comunes a estas técnicas* que es conveniente analizar desde ahora. De entrada, todas ellas van a basar su actividad en los *tiempos de carga* que genera la obtención de los productos o componentes en los centros de trabajo, los cuales, a su vez, dependen de las *operaciones* que aquéllos conlleven. Además, estos elementos condicionan también el *Tiempo de Suministro*, básico para periodificar las cargas calculadas. Analizaremos, pues, estos elementos antes de abordar la evaluación y selección de las alternativas de ajuste de la capacidad a medio y corto plazo.

[10] Ver, por ejemplo, Wemmerlöv (1984, pág. 15) o Plossl (1983, págs. 150 y ss).

2.4. DETERMINACION DE LAS NECESIDADES DE CAPACIDAD: ELEMENTOS BASICOS

Prácticamente todas las técnicas de Planificación de Capacidad mencionadas en el apartado anterior emplean un tiempo de carga unitario que, multiplicado por el número de unidades a obtener de un ítem o producto final, proporciona la **carga generada** por la ejecución del lote en cuestión. El valor de dicha variable es clave en la determinación de los tiempos de suministro, pues éstos proceden de la distribución temporal de la citada carga. Sin embargo, su determinación puede no resultar fácil, especialmente en distribuciones productivas por proceso (ver J. A. D. Machuca y otros, 1994, Capítulo 9), dado que dicho lote puede requerir diferentes operaciones en distintos centros de trabajo (CT). Si ése es el caso, será necesario determinar la carga generada por el lote en cuestión en cada uno de ellos, por lo que habrá que considerar cuáles son las operaciones a realizar y en qué CT.

Con esta información, que define las **Rutas** de los diferentes ítems y los datos sobre el **tiempo de ejecución y de preparación** de una operación, se calcula el **tiempo de carga unitario**, provocado por aquélla en los distintos CT. A partir de dicho valor se puede calcular el **tiempo de carga de un ítem** en cada CT y, teniendo en cuenta el tamaño **de los lotes de pedido**, la carga provocada por estos últimos. En el Apéndice 2.A, de este capítulo, se muestra cómo se llevan a cabo los cálculos mencionados utilizando un ejemplo ilustrativo; en éste se considera, además, la influencia que, en los conceptos mencionados, tiene la posible existencia de **items defectuosos** dentro de un lote.

2.5. ALGUNOS COMENTARIOS SOBRE EL TIEMPO DE SUMINISTRO

Como vimos en el Capítulo 1 (Apartado 1.4.2.3), el TS no es algo que viene dado; la empresa puede y debe controlarlo. Esto hace que algunos autores no compartan la forma de determinar el TS medio allí descrita, dado que, si la Planificación y Control de Capacidad y/o la Programación de Operaciones no son adecuadas, puede provocar un peligroso círculo vicioso que se muestra en la Figura 2.3.

En base a esto, si el TS real va aumentando y se va desviando del planificado, la solución no es considerar que los sistemas de planificación y control son

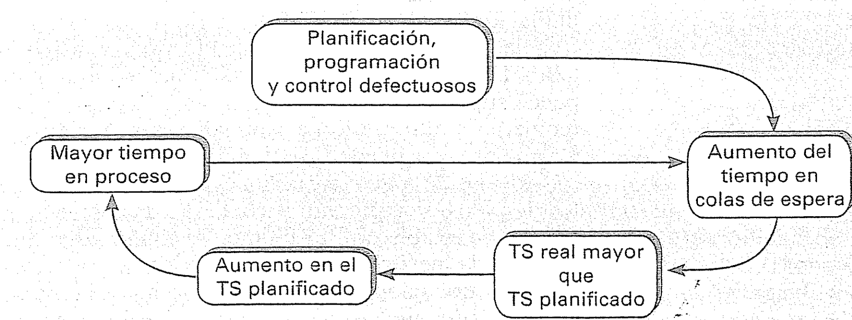


Figura 2.3. El círculo vicioso del tiempo de suministro (TS).

adecuados y suponer que el TS planificado es erróneo; ello conduciría, como hemos visto, a aumentar este último, lo cual acabaría poniéndolo fuera de control. Como apuntábamos anteriormente, la solución es ir a las causas, es decir, ver qué centro o centros de trabajo provocan el aumento y rehacer la Programación de Operaciones y/o la Planificación de Capacidad, ajustando, en este último caso, necesidades y disponibilidades para intentar que se cumpla el TS planificado. Respecto al primer caso, el control de prioridades puede hacer que el TS real de un pedido se acorte o alargue, simplemente haciéndole saltar la cola si su prioridad es mayor que la de todos los pedidos que están en ella (ver Capítulo 1).

2.6. ALTERNATIVAS PARA ADECUAR LA CAPACIDAD DISPONIBLE Y NECESARIA A CORTO Y MEDIO PLAZO

Como se expuso en el Apartado 2.1, las deficiencias o los excesos de capacidad determinados para períodos de medio, corto o muy corto plazo, no pueden resolverse mediante la realización de medidas encaminadas a alterar la estructura productiva fija. En esta situación, sólo caben medidas de ajuste transitorio, que van a pretender acercar la Capacidad Disponible a la Necesaria, o viceversa, según actuemos sobre las necesidades o sobre las disponibilidades. Ante posibles divergencias entre dichas variables caben dos tipos de medidas: actuar sobre la demanda, de forma que los correspondientes planes de producción se adecúen a la capacidad disponible, o bien alterar esta última para que se ajuste a las necesidades derivadas de la planificación productiva. Como veremos en el Capítulo 3 (Apartado 3.3), son las acciones sobre las disponibilidades las que con más frecuencia se emplearán en el contexto objeto del presente capítulo. Por ello, comentamos a continuación las principales medidas de este tipo:

2.6.1. Contrataciones o despidos

Con esta medida se aumenta o disminuye el número de trabajadores por turno y/o los turnos por jornada. Se trata, quizá, de la opción más drástica e implicaría el despido de trabajadores durante períodos de demanda baja y su contratación eventual en los de demanda elevada; es muy habitual en empresas con demanda de alta estacionalidad, tales como las firmas cerveceras durante primavera y verano o las de conservas de vegetales durante épocas de cosecha. No obstante, la utilización de este tipo de medidas tiene serios inconvenientes. Por una parte, las normas laborales (o incluso los convenios colectivos), pueden establecer grandes limitaciones a la hora de los despidos, los cuales, además, generan malestar en trabajadores y sindicatos, pudiendo traer consigo aumentos de la conflictividad laboral. Por otra parte, la especialización de la mano de obra necesaria también puede suponer un problema a la hora de las contrataciones, siendo difíciles si se requiere un alto grado de especialización. Sería necesaria una gran capacidad de formación, que puede no estar disponible.

Además de todo esto, acciones de este tipo, tanto en las contrataciones como en los despidos, siempre van a conllevar una serie de costes que, a veces, resultarán difíciles de establecer. Por último, las continuas variaciones de plantilla van a llevar a una caída inevitable de la productividad debido, de un lado, al descenso en la moral de los trabajadores y, de otro, al hecho de la introducción de personal inexperto.

Por todo ello, muchas empresas (es el caso de las japonesas) tienen como política el prohibir o limitar al máximo este tipo de actuaciones.

Cuadro 2.1. Consideraciones sobre las Colas de Espera, los TS y el Control I/O

La **Cola de Espera** de un CT se puede definir como el volumen de trabajo que, en un momento determinado, está a la espera de ser procesado en el mismo (lo que resta del lote en proceso, más lo que está a la espera «a puerta de taller», todo ello expresado en unidades estándar). Es evidente que el valor que ésta tome al final de un período será igual al que tenía al final del anterior más la carga llegada durante el período (pedidos emitidos al CT medidos en h.e.), menos la capacidad desarrollada (pedidos, o parte de ellos, elaborados durante el período, medidos en h.e.). Su evolución dependerá en gran medida de la planificación y control de dicha capacidad: si ésta es correcta, los pedidos que se emitan se ajustarán a las disponibilidades de capacidad.

Desde una cierta visión tradicional, las colas se contemplan como necesarias y deseables, pues representan un inventario de seguridad que garantiza la maximización del uso de los recursos productivos. Sin embargo, la asunción de dicha hipótesis implicaría aceptar los efectos negativos de las colas, cuyo tamaño y evolución marcarán la del stock de producción en proceso y tendrán una gran influencia en los TS; desde este punto de vista, sería ideal una cola de espera igual a 0. Sin embargo, el emplear cola cero sería bastante arriesgado en una *configuración por funciones de trabajo sobre pedido* (ver J. A. D. Machuca y otros, 1994, Capítulo 5), dado que en ésta se hace imposible coordinar al 100 por 100 los momentos de entrada y salida de los pedidos en los CT y, aunque se consiguiera, cualquier retraso de un pedido podría dejar a varios CT ociosos. Para evitar esto, se hace necesario trabajar con una cierta cola en cada CT. El equilibrio se establecerá en un cierto valor denominado **Cola Objetivo**, que deberá ser lo más pequeño posible (el suficiente para asegurar la ocupación deseada de los CT). Por supuesto, no se trata de mantenerlo exactamente con posterioridad, sino de que no se desvíe de unos márgenes de tolerancia calculados y, sobre todo, de que no crezca (lo que indicaría que las cargas enviadas superan a las disponibilidades) o decrezca (lo que indicaría que hay una capacidad infrautilizada) continuadamente. Las medidas correctoras no se tomarán, hasta que se aprecie una tendencia que va a llevar a salirse del margen.

Se deduce, pues, que es necesario planificar la evolución que va a tener esta cola, al menos durante las próximas semanas, al objeto de detectar las desviaciones con tiempo para corregirlas. En este sentido, el análisis *Input/Output* (ver Capítulo 9) se convierte en una herramienta de inestimable ayuda, dado que permite determinar cual va a ser dicha evolución en un CT en base a la Carga Real y Planificada y a la Capacidad Disponible Real y Planificada. Permitirá determinar si la cola se va a salir o no de los márgenes de tolerancia; en caso afirmativo se podrán tomar medidas encaminadas a aumentar/disminuir la capacidad o a disminuir/aumentar la producción. Además, si es necesario tomar continuamente medidas para corregir la cola, ello indicará, si la planificación y control de la capacidad es correcta, que la Cola Objetivo o los márgenes de tolerancia han sido deficientemente calculados.

Como podemos apreciar, además, mediante el control de la Cola de Espera se está determinando la adecuación de las Necesidades y Disponibilidades de Capacidad planificadas, así como de las medidas de ajuste que se hayan tomado; en este sentido, pues, el Análisis *Input/Output* se convierte en la técnica de Control de la Capacidad por excelencia en lo que al Corto Plazo se refiere. No obstante, el desarrollo de esta técnica implica la previa determinación de la carga planificada, por lo que la analizaremos posteriormente (Capítulo 9).

En entornos más predecibles, en los que se enfoque a la gestión del flujo de trabajo en el centro más que al rendimiento de este último, las colas se hacen menos necesarias y pueden ser reducidas al mínimo. En el JIT (Capítulos 6 y 7), esto constituye uno de los objetivos a cumplir, lo cual traería consigo la disminución de los TS y del inventario en curso.

2.6.2. Programación de vacaciones

Permite reducir la mano de obra sin ningún coste adicional, pues basta con hacer coincidir las vacaciones del personal con los períodos de menor demanda. Incluso se podría proceder al cierre (cosa muy común) de las instalaciones en dicha época, aprovechando para tareas de limpieza y mantenimiento. La posibilidad de emplear esta medida viene muy condicionada por las posibilidades que los convenios colectivos o, en general, la normativa laboral concedan a los trabajadores en relación con la elección de su período vacacional. No obstante, algún incentivo económico podría orientar su decisión.

2.6.3. Realización de horas extras o mantenimiento de tiempos ociosos en determinados períodos

Se lleva a cabo sobre las horas/jornada de las condiciones normales de producción establecidas. Se trata de una opción menos drástica que la primera y más rápida de llevar a la práctica, aunque también de posibilidades más limitadas. Implicaría el mantener la misma fuerza de trabajo, variando sólo el número de horas trabajadas por período. Las horas extras suelen estar permitidas en casi la generalidad de los casos, aunque siempre nos encontraremos con las limitaciones que, sobre su número, pueda establecer la normativa laboral vigente o, incluso, los convenios colectivos. También hay que considerar que los trabajadores no están obligados a aceptarlas, lo que puede originar un serio *handicap* en determinados períodos (por ejemplo, verano, navidades, etc.).

En términos generales, se puede decir que no es conveniente abusar de este tipo de medidas, dado que un alto número de horas trabajadas, siempre conllevará efectos negativos tales como reducciones de la productividad, peor calidad del producto, incremento del número de accidentes y enfermedades profesionales, etc. Además, su coste es superior a los de las horas de jornada regular (dicho incremento dependerá de si son horas nocturnas, festivas o normales) y conllevan otros costes adicionales (por ejemplo, los costes que implica la necesidad de mantener abiertas las instalaciones).

En cuanto a los tiempos ociosos, su utilización se suele limitar a los casos inevitables. Además de que el trabajador fijo va a seguir percibiendo sus retribuciones, la eficiencia del uso del equipo productivo se reduce y la repercusión de los costes fijos de la empresa en cada unidad producida puede aumentar notablemente, con los consiguientes perjuicios sobre los precios de venta, demanda, etc. No obstante, puede ser una opción más adecuada que el despido, sobre todo con trabajadores muy especializados o eficientes, que son difíciles de reemplazar. Por otra parte, hay que tener en cuenta que, en muchas ocasiones, será mejor mantener recursos ociosos que producir algo cuya venta no es segura y que puede provocar una innecesaria acumulación de inventarios (ver Capítulo 8).

2.6.4. Movilidad del personal

Este se destinaría a otras actividades (productivas, de mantenimento, etc.) en períodos en que su centro de trabajo habitual esté subcargado. Ello implica la disponibilidad de personal multifuncional, capaz de realizar múltiples tareas. Aunque no conlleva incrementos de salario, sí podría tener un coste en cuanto a la menor productividad de los trabajadores provocada por la menor especialización, al menos en algunas tareas. A pesar de las posibles limitaciones de esta opción, puede dar muy buenos resultados y ha sido una de las más utilizadas por las empresas japonesas en los últimos años (ver Capítulo 7).

2.6.5. Utilización de rutas alternativas

Con ello, ciertos productos o componentes a fabricar, que han de emplear en su ruta un cierto CT que está muy sobrecargado, se desvían hacia otro con capacidad disponible que pueda realizar una o varias operaciones de la ruta habitual. Dado que, normalmente, esto implica menor eficiencia, se traducirá lógicamente en un aumento del coste de producción unitario.

2.6.6. Subcontratación

Se trata de encomendar a otra empresa del sector la realización del proceso de obtención de una cierta cantidad de unidades (o de una parte del mismo), lo cual permitiría aumentar la producción en un cierto período de tiempo.

Su utilización no implica la realización de inversiones incrementales ni presenta limitaciones legales y, en principio, pudiera parecer que sólo conlleva como inconveniente el incurrir en costes incrementales (por el margen que habrá de obtener la empresa subcontratada). Sin embargo, los inconvenientes pueden ser mayores. Por un lado, en el caso de subcontratar productos completos, puede producirse la pérdida del cliente si éste ha de entrar en contacto con la empresa subcontratada, cosa frecuente en el sector servicios. De otro lado, es necesario contar con posibles subcontratados, los cuales no siempre existen. Además, hay que tener en cuenta que en esta actuación la empresa pierde, en cierta medida, el control del proceso productivo, al menos durante una parte de éste y, en consecuencia, sobre el producto terminado y su calidad, por lo que es necesario contar con empresas a subcontratar de mucha confianza. Además, habría que considerar si las existentes cuentan o no con capacidad disponible en el momento en que se necesiten; este último punto muestra el interés de prestar una gran atención a la comunicación y relación con los proveedores (ver Capítulos 4 a 7)

2.6.7. Variaciones del volumen de inventario

Con esta medida se trataría de mantener una producción superior a la necesaria durante los períodos de bajas necesidades, acumulando inventario para satisfacer las necesidades de los períodos de demanda alta. Esto implicará, por supuesto, el incurrir en un incremento de los inventarios mantenidos, con los consiguientes aumentos de costes (ver Apartado 1.4.2.2)

También puede trabajarse con inventarios negativos o, lo que es lo mismo, con **pedidos pendientes** que se van a servir con retraso. Esto implica desplazar total o parcialmente la satisfacción de la demanda a períodos posteriores a aquel en que se produce. Ello trae consigo, pues, establecer unilateralmente un plazo de espera obligado para los clientes, que podrían o no aceptar. La posibilidad de utilización de esta medida dependerá mucho de cómo éstos acepten el retraso. Esta situación suele estar más asumida por el cliente de las empresas que trabajan sobre pedido que por aquellos que compran en las que lo hacen para inventario y, por supuesto, que por los que acuden a las empresas de servicios.

El coste derivado de este tipo de actuaciones suele ser difícil de valorar. Deberá incluir cuestiones como la posible pérdida de la venta o, incluso, del cliente, la disminución de la satisfacción de los mismos, costes adicionales por envíos urgentes o trabajo adicional del personal administrativo y de ventas, etc.

2.6.8. Reajuste del tamaño de los lotes de pedidos

Especialmente en el caso de fabricación por lotes, la forma de agrupar las necesidades de producción de los distintos períodos de tiempo en pedidos concretos, influye en la distribución temporal de la carga en los centros de trabajo. Con frecuencia, dichos agrupamientos pueden ser alterados sin que ello implique retrasos en la producción (ver Capítulo 4).

Los cambios en el tamaño de los lotes también influyen en la mayor o menor utilización de la capacidad cuando el tiempo de preparación es largo.

2.6.9. Factores a considerar en la elección de alternativas

Como puede apreciarse por lo expuesto en los apartados anteriores, son muchas las opciones que a la empresa se le presentan a la hora de ajustar capacidad y demanda. La adopción de unas u otras dependerá de las circunstancias del caso concreto. En primer lugar, deberán considerarse una serie de factores:

a) Las limitaciones del entorno en que la empresa se desenvuelve. Tal es el caso del marco legal laboral, por ejemplo, en cuanto a limitaciones sobre contrataciones y despidos, horas extras, etc.
b) Las políticas de la empresa, que van a definir las reglas del juego. Por ejemplo, la limitación de los despidos a situaciones extremas o la no utilización de tiempos ociosos.
c) El plazo disponible para ponerlas en marcha y corregir el desajuste. Por ejemplo, es difícil subcontratar una cierta cantidad de producto para cubrir un desfase en la semana en curso.
d) El tipo y volumen de la divergencia capacidad disponible/carga. No parece lógico, por ejemplo, contratar personal para eliminar una divergencia puntual de una semana concreta.

Una vez consideradas las cuestiones anteriores, que actúan casi a modo de restricción, será necesario seleccionar, de entre todas las viables, las más adecuadas al caso, para lo cual será necesario acometer un proceso de evaluación. Para ello, previamente, será necesario seleccionar los criterios a emplear para realizarla. A este respecto, en el corto y medio plazo, el coste de la aplicación de unas u otras opciones es, sin duda, el criterio predominante, aunque no el único (ver Capítulo 3, Apartados 3.3 y 3.4). La problemática de la selección y evaluación se analizará para el caso concreto del Plan Agregado en el próximo capítulo.

2.7. CONCLUSIONES: EL DISEÑO DEL SISTEMA DE PLANIFICACION Y CONTROL DE LA CAPACIDAD

Una vez introducido el sistema de Planificación y Control de Capacidad, y a falta de estudiar las diferentes técnicas empleadas en este contexto, consideramos conveniente referirnos a varias cuestiones básicas relacionadas con el Diseño y Gestión del Sistema.

La primera hace referencia a los niveles de planificación a implantar. Como vimos en el Apartado 2.3, la necesidad de planificar la capacidad va asociada a los correspondientes planes de producción. Ello implica que si una empresa no precisa desarrollar alguno de ellos, tampoco precisará la correspondiente planificación de capacidad. No obstante, es conveniente no olvidar que los diferentes niveles de esta última se desarrollan con diferentes propósitos y que, por tanto, son complementarios. Si se necesita observar la evolución de la capacidad durante varios años para determinar, por ejemplo, la necesidad de realizar inversiones en equipo capital, será necesario un horizonte de largo plazo, actuándose por tanto a partir del correspondiente Plan de Producción. Si se trata de la determinación de medidas de ajuste temporal, podría ser suficiente calcular las necesidades de planificación para un horizonte de algunas semanas.

De otro lado, al decidir sobre el desarrollo de unos u otros niveles de Planificación de la Capacidad, habrá que considerar otro aspecto complementario igualmente importante: qué técnicas emplear en un nivel concreto. Ambas cuestiones deben verse condicionadas por un adecuado análisis coste/beneficio; mayor precisión en la planificación implicará mayor coste por la mayor necesidad de datos, capacidad del *hardware*, tiempo de computación, etc. La empresa deberá, pues, establecer sus necesidades, los niveles y técnicas que podría emplear y valorar los costes y beneficios (tangibles e intangibles) que obtendría en cada caso. Si, por ejemplo, los Perfiles de Recursos (ver Capítulo 9) pueden proporcionar la información suficiente para gestionar su capacidad a corto plazo, podría evitarse emplear CRP (ver Capítulo 5), cuyo coste de implementación es mucho mayor, y pasar directamente al muy corto plazo. Sin embargo, si sus procesos son complejos y con muchos componentes, empleando además múltiples centros de trabajo comunes y elaborándose muchos pequeños lotes de numerosos productos diferentes, actuar así le llevaría a perder el control de los tiempos de suministro, a múltiples retrasos en la finalización de pedidos, a aumentos de la producción en proceso, etc., pudiendo resultar unos costes superiores al ahorro producido.

Una tercera cuestión a considerar es el horizonte de cada nivel de planificación, así como la periodificación de los planes. En este sentido, la regla general es que sean iguales a los del Plan de Producción que los origina. Sin embargo, en muchas ocasiones no tiene por qué ser así. Si, por ejemplo, se trabaja con un Plan de Materiales que ha sido obtenido por un sistema MRP para 52 semanas (ver Capítulo 4), es posible que el plan CRP de él derivado pueda desarrollarse sólo para 12 o 16 semanas (incluso menos) dado que, en las restantes, existirán importantes cambios futuros y que las decisiones de ajuste siempre van a requerir un período menor para llevarlas a cabo. La viabilidad del resto del Plan de Materiales puede quedar refrendada en la Planificación de Capacidad Aproximada, suponiendo ello un notable ahorro de tiempo, esfuerzo y coste.

Otro aspecto importante que hay que considerar en las tres cuestiones citadas es, sin duda, la flexibilidad de la capacidad de las unidades productivas a planificar y controlar. En el caso de empresas con procesos caracterizados por la utilización intensiva de equipos de capacidad poco flexible, el uso y aprovechamiento de ésta se vuelve vital y los aumentos requieren mucho tiempo y coste. Si, por el contrario, los procesos están dominados por la utilización intensiva de mano de obra, la capacidad es más flexible (éste suele ser el caso de las empresas de servicios) y las medidas de aumento necesitan menor tiempo de implementación y, normalmente, menor coste. Por otra parte, no sólo la complejidad de los procesos, la variedad y cantidad de items y de rutas y la configuración deberán ser tenidos en cuenta.

El equilibrado de capacidad y carga se hace más difícil al disminuir el grado de fiabilidad de las previsiones, siendo ello especialmente relevante en las empresas que trabajan sobre pedido. En estas firmas, las continuas variaciones en el mix de productos causan desajustes frecuentes y poco previsibles en la capacidad a corto plazo, que intentan paliarse con las medidas transitorias mencionadas. Sin embargo, debemos tener en cuenta que dichos problemas disminuyen cuando uno de los objetivos de las estrategias productivas es la flexibilidad y el diseño del sistema se ha realizado consecuentemente (por ejemplo: utilización de células de manufactura con personal polivalente (ver Capítulo 7 y J. A. D. Machuca y otros, 1994, Capítulos 5, 9 y 11)).

Un cuarto elemento a considerar es el proceso de control, que debe ser formalizado de forma que se asegure un desarrollo continuado. El determinar la

evolución (al menos semanal) de las colas de espera, el establecer una revisión de su evolución planificada (por ejemplo mediante el análisis *Input/Output*), la replanificación de la capacidad cada vez que se lleve a cabo la del Plan de Producción, controlar la evolución de los tiempos de suministro y de la Capacidad Disponible (tal y como se describió en el Apartado 2.2.5), se vuelven requisitos indispensables para asegurar el buen funcionamiento del Sistema de Planificación y Control de la Capacidad. No debe olvidarse que nos enfrentamos a un mundo complejo y cambiante, y que todas las actividades de planificación deben asumir dichos cambios, so pena de que, mañana, la planificación realizada no tenga más valor que el papel que la recoge.

Por último, no quisiéramos concluir sin hacer una reflexión, a veces olvidada, que no por obvia es menos importante: *la Planificación y Control de la Capacidad* no es un problema exclusivo del Subsistema de Operaciones, al igual que no lo es la Planificación de la Producción. *Es una actividad que condiciona y se ve condicionada por las otras áreas funcionales de la empresa* y estos condicionamientos han de ser tenidos en cuenta a la hora de diseñar el sistema. Por ejemplo, no es igual el caso de una empresa que fabrica para otras empresas, que el caso de aquellas que fabrican un bien de consumo. En el primer caso, un retraso en la entrega de un pedido puede llevar a la empresa-cliente a tener que parar su producción (con los consiguientes perjuicios económicos), mientras que, en el segundo, posiblemente sólo se cree una insatisfacción del cliente individual por no poder disfrutar el bien cuando lo tenía previsto. Siendo en los dos casos indeseable el efecto, lo es sin duda mucho más en el primero, que requeriría una mayor exactitud y cuidado en la Planificación y Control de la Capacidad. Incluso las medidas de ajuste de capacidad (estructurales o transitorios) vendrán condicionadas por otros departamentos (por ejemplo: el financiero en el caso de ampliación de estructura fija, el de personal en el caso de ajuste del nivel de mano de obra, el de mantenimiento en cuanto que sus programas preventivos deberían adecuarse a momentos de exceso de capacidad, etc.). En definitiva, la integración que propugnamos desde el principio de esta obra, no presenta ninguna excepción en este punto.

APENDICE 2.A

UN EJEMPLO DE DETERMINACION DE LAS NECESIDADES DE CAPACIDAD[1]

2.A.1 LA CONSIDERACION DE LAS RUTAS

La sucesión de operaciones necesarias en los diferentes CT para la elaboración de un ítem se denomina **Ruta**. Esta comienza en la operación en que se incorpora la primera materia prima o el componente semiterminado, a partir de los cuales se elabora. Tendremos, pues, una ruta para cada ítem fabricado por la empresa, así como para el montaje, a partir de ellos, del producto final. Veámoslo con un ejemplo muy simplificado relacionado con una empresa fabricante de muebles de madera.

Se elaboran dos productos, mesas (*M*) y armarios (*A*). La fabricación de *M* requiere cuatro operaciones: O1 en el CT1 (pulido de la madera adquirida), O2 en el CT2 (cortado y acanalamiento), O3 en el CT3 (encolado y montaje de la mesa) y O4 en el CT1 (barnizado y lacado final). Por su parte, la elaboración del armario se compone de cinco operaciones: O11 en CT2 (cortado y acanalado de la madera para la estructura), O12 en CT4 (pegado de la estructura), O13 en CT3 (montaje de bisagras y cerraduras en puertas), O14 en CT3 (montaje de puertas, cajonera y paredes) y O15 en CT1 (pintura y acabado).

Todos los elementos empleados son adquiridos en el exterior, salvo las puertas y cajoneras, que son fabricadas por la empresa, llevando cada armario una cajonera y cuatro puertas. La fabricación de una cajonera implica la realización de tres operaciones: O5 (pulido de la madera en CT1), O6 (cortado y acanalado en CT2), O7 (ensamblado en CT3). Por su parte, la fabricación de una puerta conlleva tres operaciones: O8 (ensamblado de la estructura de madera en CT3), O9 (pulimentado y barnizado de los paños en CT1), O10 (pegado en CT4)

La expresión gráfica de las rutas se encuentra recogida en la Figura 2.4. Obsérvese que contamos con cuatro rutas. La primera es el proceso completo de obtención de la mesa, dado que este producto no incorpora ítems elaborados por la empresa. Por el contrario, la del armario, al incorporar otros componentes fabricados por la firma (puertas y cajonera), da origen a tres rutas: una para cada componente fabricado y otra para el montaje del producto a partir de estos últimos (salvo que procedan, obligatoriamente, de un mismo proceso). Como vemos, una ruta no debe incluir la obtención de más de un ítem fabricado o montado por la empresa. De esta forma, establecer los tiempos de carga generados por un ítem en los diferentes CT, será igual a establecer el tiempo de carga generado por su ruta. Caso de que ésta fuera excesivamente larga, se podría descomponer en varias subrutas. La Tabla 2.1 muestra algunos datos de interés de los distintos CT.

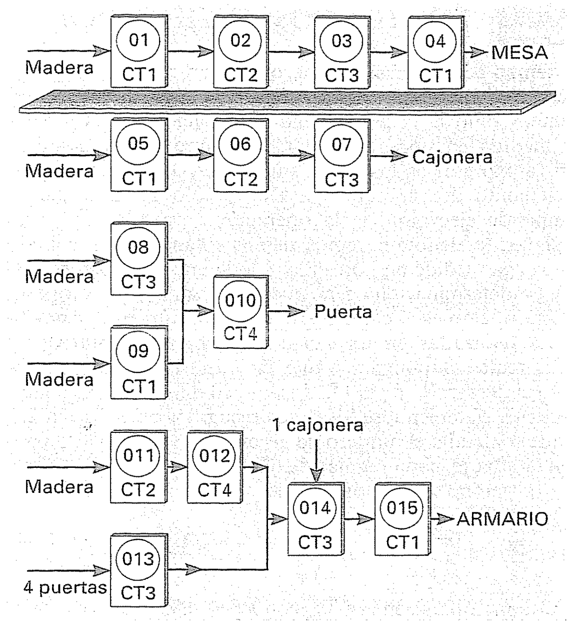


Figura 2.4. Rutas de los diferentes ítems.

Tabla 2.1. Datos de los centros de trabajo

CTk	Uk	Ek	Tiempo preparación en horas estándar
1	0,9	0,92	2,5
2	0,95	0,85	4
3	0,93	0,9	3,8
4	0,97	0,88	6

En relación con el concepto de **tiempo de suministro total o acumulado**, definido en el Capítulo 1 (Apartado. 1.4.2.3.), si en el presente ejemplo los TS fueran de dos semanas para conseguir la madera, una para fabricar las puertas, dos para fabricar la cajonera y una para montar el armario, el TS total sería de cinco semanas, ya que las puertas y la cajonera podrían elaborarse simultáneamente.

[1] Para una mejor comprensión de este ejemplo se aconseja el estudio previo del Capítulo 6 de J. A. D. Machuca y otros (1994).

2.A.2 LOS TIEMPOS DE EJECUCION

El **tiempo de ejecución** de una operación no es más que el necesario para desarrollarla una vez en el CT correspondiente. Como la disponibilidad de capacidad del CT va a ser medida en horas estándar, el tiempo de ejecución se deberá expresar en las mismas unidades, dado que va a ser el elemento determinante para el cálculo de la carga. Al tiempo de ejecución de la operación *i*, medido en horas estándar, lo denominaremos **tiempo estándar** (te_i); cuando éste venga medido en horas reales lo llamaremos **tiempo real** (tr_i). La determinación del te_i puede realizarse de dos formas.

Una opción es el cálculo en base a un número de repeticiones realizadas en un cierto número representativo de horas reales. Supongamos que, en nuestro ejemplo, se observó el desarrollo de la O2 durante 20 días elegidos aleatoriamente, obteniéndose los datos recogidos en la Tabla 2.2, donde se detalla el número de veces que se realizó la operación en una jornada regular de ocho horas reales. En base a ello, el tiempo real medio empleado por operación, fue:

$$\overline{tr}_2 = \sum_{i=1}^{20} (tr_i \times f_i)/\Sigma f_i = \mathbf{0{,}504\ horas\ reales}$$

Al desarrollarse en el CT2, con $E_2 = 0{,}85$ y $U_2 = 0{,}95$, el correspondiente tiempo estándar, te_2, será:

$$te_2 = \overline{tr}_2 \times E_2 \times U_2 = 0{,}504 \times 0{,}85 \times 0{,}95 = \mathbf{0{,}407\ h.e.}$$

Tabla 2.2. Cálculo en función del número de repeticiones de la Operación O2

R_i: Número repeticiones	13	14	15	16	17	18	19
tr_i $(=8/R_i)$	0,615	0,571	0,533	0,5	0,470	0,444	0,421
f_i: frecuencia	1	2	4	6	4	2	1

La segunda opción es la determinación del tiempo normal o estándar por los procedimientos característicos del *estudio de tiempos* (ver J. A. D. Machuca y otros, 1994, Capítulo 6). Supongamos que, en nuestro ejemplo, se ha realizado un estudio para la O3 que, para 25 observaciones arrojó los resultados que aparecen en la Tabla 2.3, en la que la actividad normal es igual a 100:

Tabla 2.3. Cálculo por estudio de tiempos de la Operación O3

Tiempo observado (to_i) en minutos	12	13	14	15	15	16	16
Actividad	110	110	100	100	90	90	80
Frecuencia	2	3	5	2	6	3	4

Si empleamos el escrutinio aritmético para calcular el tiempo normal de la operación O3, tendremos:

$$tn_i = \sum_{1}^{N} (to_{ij} \times \text{Actividad}_{ij})/(100 \times N)$$

$$tn_3 = \sum_{1}^{25} (to_{3j} \times \text{Actividad}_{3j})/(100 \times 25) =$$

$$= 13{,}788 \text{ min. estándar} = \mathbf{0{,}23\ h.e.} = te_3$$

Este tn_i sería el tiempo de ejecución en horas estándar (horas calculadas a eficiencia 1 y utilización 1). Ello es debido a que, por una parte, se ha partido del tiempo observado, en el que siempre se está trabajando, por lo que coincide con el concepto de tiempo productivo que vimos en 2.2.3.1. Por otra parte, en cada observación se multiplica por la Actividad observada y se divide por 100 (Nivel de Actividad Normal), lo cual equivale a multiplicar por el factor de eficiencia *E*.

Emplear una u otra forma de actuar dependerá del tipo de operación de que se trate. Así, en el caso de que la eficiencia y el tiempo empleado sean variables, por depender en gran medida del trabajador que las desarrolle, será más adecuado el estudio de tiempos. En este caso, la maquinaria interviene poco al ser procesos poco automatizados, por lo que no será ésta la que marque la eficiencia. Si, por el contrario, nos encontramos con operaciones de un alto nivel de automatización, será la maquinaria del CT la que marque en buena medida la Actividad de trabajo, por lo que la eficiencia del CT sería válida para valorar la de la operación. En este caso, podría actuarse con la primera opción, más cómoda y rápida.

Si se utiliza el segundo procedimiento, el tiempo real de ejecución para la operación O3 vendría dado por:

$$tr_3 = te_3/E_3 \times U_3$$

donde la eficiencia a tomar, E_3, sería la media de los niveles de actividad obtenidos en la muestra, es decir:

$$E_3 = \sum_{1}^{25} (A_j \times f_j)/(100 \times N) \approx 0{,}95$$

Esta no coincide con la que aparece en la Tabla 2.1 para el conjunto del CT 3, donde es igual a 0,9. Debido a ello, emplearemos para E_3 el valor obtenido más arriba. Lo que sí consideramos válido para todas las operaciones es el factor de utilización de CT_3, que es 0,93. Por todo ello:

$$tr_3 = 0{,}23/(0{,}93 \times 0{,}95) = \mathbf{0{,}26\ horas\ reales}$$

Estos tiempos aparecen en la Tabla 2.4 junto a los de las operaciones O1 y O4, que consideramos conocidas.

Tabla 2.4. Tiempos reales y estándar de las Operaciones

Operación	tr_i	te_i	E_k	U_k
O1	0,5	0,414	0,92	0,9
O2	0,504	0,407	0,85	0,95
O3	0,26	0,23	0,95	0,93
O4	0,8	0,662	0,92	0,9

2.A.3 LOS TIEMPOS DE CARGA UNITARIOS[2]

No es el tiempo de ejecución el único que genera carga en un centro de trabajo. Existen tres tipos de elementos que consumen tiempo en el desarrollo de procesos productivos (ver el estudio de tiempos en J. A. D. Machuca y otros, 1994, Capítulo 6):

- **Regulares**, que aparecen cada vez que la operación se realiza y que dan origen al tiempo de ejecución.
- **Irregulares** o **de frecuencia**, que aparecen cada cierto número de veces que se realiza la operación, con una frecuencia fija.
- **Aleatorios**, que aparecen con frecuencia variable.

De las dos últimas categorías, el único elemento que es realmente tiempo productivo, derivado de la realización de la operación, es el dedicado a la **preparación** del centro de trabajo, *necesario para ajustar y disponer la maquinaria e instalaciones en las condiciones adecuadas para llevarla a cabo, tras haber desarrollado otra operación diferente.* Este tiempo de preparación puede no ser necesario en una configuración continua, pero sí en una por lotes (ver J. A. D. Machuca y otros, 1994, Capítulo 5). El resto de los elementos constituye tiempo improductivo que, por tanto, ya se encuentra incluido en el factor de Utilización que vimos en el Apartado 2.2.3.1 (esto implica que, al convertir el tiempo estándar en real dividiendo por *E* y *U*, ya se añaden estos tiempos suplementarios[3]). El **tiempo de carga**, *tc*, será el conjunto formado por los tiempos de ejecución y preparación.

[2] Para la determinación de los diferentes tiempos de carga, seguiremos a partir de aquí la obra de S. G. García y J. A. García (1994).

[3] Sería realizar un cálculo similar, pero inverso, al que nos lleva a determinar el tiempo total de un componente, como suma de los tiempos tipo de los elementos regulares, más la de los elementos de frecuencia divididos por su frecuencia de aparición, más la de los elementos aleatorios divididos por su frecuencia media. En este caso se toman tiempos normales (estándar) y se le añaden los suplementos por fatiga, etc., al multiplicarlos por 1 + *k* para establecer tiempos tipo. Como lo que establecemos ahora son tiempos estándar, deducimos los suplementos y los elementos de frecuencia y aleatorios (salvo el tiempo de preparación) al multiplicar por *U*.

El valor de este último podrá variar para una operación en función de cual sea la previamente realizada, por lo que se suele emplear un **tiempo de preparación medio**, al que vamos a denominar tp_k (expresado en horas estándar), siendo *k* el CT a que corresponde. A **la carga de una operación** *i*, que se desarrolle en el CT_k, se le deberá asignar un **tiempo de preparación**, al que vamos a denominar tp_{ik}, y que será igual al tp_k; este valor será cero, caso de que *i* no se desarrolle en el CT_k.

Por supuesto, tp_{ik} corresponde a un lote completo, lo cual complica la obtención del tiempo unitario de carga. Así, si llamamos te_i al tiempo estándar de la operación *i*, el **tiempo unitario de carga generado** al desarrollar la **operación** *i* correspondiente a la ruta del producto final o **componente** *j*, que se realiza en el CT_k será:

$$tc_{ijk} = te_i + tp_{ik}/Q_j \quad (Q_j\text{: lote a procesar de } j) \quad [1]$$

Normalmente, y dado que el tamaño de Q_j (número de veces a realizar la operación) puede ser variable, ello implicaría que tc_{ijk} quedaría en función de dicho tamaño. Esto conllevaría un aumento de los cálculos al emplear algunas de las técnicas anteriormente mencionadas. Por ello, éstas emplean el tamaño de lote medio de *j*, $\overline{Q}_j$[4] y así se reproducen en los paquetes de *software* existentes en el mercado[5] se llega así a un valor constante:

$$tc_{ijk} = te_i + tp_{ik}/\overline{Q}_j \quad [2]$$

Esta expresión nos llevaría a unos tc_{ijk} en horas estándar para las operaciones de nuestro ejemplo, como los expresados en la Tabla 2.5, supuesto un lote medio de 100 unidades de *M*. Lógicamente, el *tc* de una operación, afectará exclusivamente al CT en que ésta se desarrolla.

Tabla 2.5. Determinación de los tiempos de carga unitarios

Operación	te_i	tp_{ik}	$tc_{ijk} = te_i + tp_{ik}/100$
O1	0,414	2,5	$tc_{1M1} = 0{,}439$
O2	0,407	4	$tc_{2M2} = 0{,}447$
O3	0,23	3,8	$tc_{3M3} = 0{,}268$
O4	0,662	2,5	$tc_{4M1} = 0{,}687$

[4] Ver, por ejemplo, Vollmann-Berry-Whybark (1991, págs. 136 y ss.) o Wemmërlov (1984, págs. 17 y ss.).

[5] Así actúa la mayoría del *software* MRP II como, por ejemplo, IMS7 de Bull, MAS-H de Martin Marietta Data Systems, MAPICS II y DB de IBM, etc.

2.A.4 TIEMPO DE CARGA DE UN ITEM Y UN LOTE EN UN CENTRO

Conocidos los tc_{ijk} de todas las operaciones, podremos determinar los **tiempos de carga, TC_{jk}, de cada componente o producto final *j*** en un cierto **Centro de Trabajo *k***. Este sería el tiempo necesario del CT*k* para desarrollar las operaciones que se corresponden en la ruta de *j* para obtener una unidad. Nótese la diferencia con el **tiempo total de carga de un ítem** en un CT (TTC_{jk}), que sería el tiempo necesario en el CT*k* para desarrollar todas las operaciones que le corresponden y que lleven a la obtención de una unidad de *j*; esto incluiría las operaciones de su ruta (la de *j*) y la de todos los componentes fabricados en CT*k* que se emplean en la obtención de *j*. Así, en el caso de *M* el TC_{Mk} coincidirá con el TTC_{Mk}, porque para obtener *M* no se emplea ningún componente fabricado por la empresa. Sin embargo, en el caso de *A*, TC_{Ak} sólo incluirá el tiempo necesario del CT*k* para montar una unidad de *A* a partir de las cajoneras y puertas ya elaboradas; por el contrario, TTC_{Ak} incluirá el tiempo necesario de *k* para montar una unidad de *A* a partir de las cajoneras y puertas (TC_{Ak}), más el tiempo necesario del CT*k* necesario para obtener 4 puertas y una cajonera. *La determinación de los TTC_{jk} es la base de la técnica de las Listas de Capacidad*, por lo que la analizaremos con ésta en el Capítulo 3.

En cuanto a la determinación del TC_{jk}, o **tiempo necesario en el CT*k***, para obtener una unidad de *j*, vendría dado por la expresión:

$$TC_{jk} = \sum_{i=n}^{m} tc_{ijk} \qquad [3]$$

representando *i* las distintas operaciones a realizar en la ruta de obtención de *j*. Ni que decir tiene que los tc_{ijk} serán cero si la operación *i* de la ruta de *j* no se realiza en *k*.

Así, y para el caso de nuestro ejemplo:

$$TC_{M1} = \sum_{i=1}^{4} tc_{iM1} = tc_{1M1} + tc_{2M1} + tc_{3M1} + tc_{4M1} = 0{,}439 + 0 + 0 + 0{,}687 = 1.126 \text{ h.e.}$$

$$TC_{M2} = \sum_{i=1}^{4} tc_{iM2} = tc_{1M2} + tc_{2M2} + tc_{3M2} + tc_{4M2} = 0 + 0{,}447 + 0 + 0 = 0{,}447 \text{ h.e.}$$

$$TC_{M3} = \sum_{i=1}^{4} tc_{iM3} = tc_{1M3} + tc_{2M3} + tc_{3M3} + tc_{4M3} = 0 + 0 + 0{,}268 + 0 = 0{,}268 \text{ h.e.}$$

A partir de esta información de un componente o producto, *j*, en un CT *k*, **la carga correspondiente a un lote de *j* de tamaño *Q***, TC_{Qjk}, sería:

$$TC_{Qjk} = TC_{jk} \times Q \qquad [4]$$

Así, la carga que generaría la obtención de 100 unidades de *M* en cada CT, sería:

$$\text{CT1: } TC_{QM1} = Q \times TC_{M1} = 100 \times 1{,}126 = 112{,}6 \text{ h.e.}$$
$$\text{CT2: } TC_{QM2} = Q \times TC_{M2} = 100 \times 0{,}447 = 44{,}7 \text{ h.e.}$$
$$\text{CT3: } TC_{QM3} = Q \times TC_{M3} = 100 \times 0{,}268 = 26{,}8 \text{ h.e.}$$

Este sería un procedimiento básico para obtener, por ejemplo, la carga generada por un lote del plan de materiales por la técnica CRP en su versión simplificada, la cual analizaremos en el Capítulo 5. Conviene destacar que el emplear para las operaciones tiempos de carga unitarios constantes puede llegar a distorsionar notablemente la carga calculada. Así, si, por ejemplo, se está empleando un tiempo de carga unitario, tc_{ijk}, para un lote medio de *j*, de tamaño μ, tendríamos:

$$tc_{ijk} = te_i + tp_{ik}/\mu$$

Al aplicar este tiempo para calcular la carga de un lote de *j*, de dicho tamaño, obtendríamos un resultado correcto:

$$tc_{ijk} \times \mu = (te_i + tp_{ik}/\mu) \times \mu = te_i \times \mu + tp_{ik}$$

Tal es el caso calculado para 100 unidades de *M*, que es el lote medio para el que se calcularon los tc_{iMk}. En el CT2, por ejemplo, sólo se desarrolla la O2 de las de *M*, y se calculó un tc_{2M2} de 0,447 h.e. La carga calculada para 100 unidades de *M* en el CT2 multiplicando tc_{2M2} por 100 (44,7 h.e.), sería la misma que obtendríamos si multiplicamos $te_2 \times 100$ y le sumásemos el tp_2 ($0{,}407 \times 100 + 4$).

Sin embargo, al aplicarlo a un lote de tamaño *Q*, diferente a μ, obtendremos una desviación:

$$TC_{Qjk} = tc_{ijk} \times Q = (te_i + tp_{ik}/\mu) \times Q = te_i \times Q + (tp_{ik} \times Q)/\mu$$

En este caso, y dado que el tiempo de preparación, no depende del tamaño del lote:

- Si $Q > \mu$, la carga calculada por tiempos de preparación será mayor que la real. Por ejemplo, para $Q = 200 > \mu = 100$, calcularíamos una carga en el CT2 de 89,4 h.e. ($200 \times 0{,}447$), mayor que la real, de 85,4 h.e. ($0{,}407 \times 200 + 4$).
- Si $Q < \mu$, la carga calculada por tiempos de preparación será menor que la real. Por ejemplo, para $Q = 50 < \mu = 100$, calcularíamos una carga en el CT2 de 22,35 h.e., cuando la real sería de 24,35 h.e.

La desviación obtenida se incrementará a medida que aumente la diferencia entre *Q* y μ y a medida que crezca el valor del tiempo de preparación. Lo normal es que la desviación que se produzca sea despreciable o, al menos, de poca consideración (por supuesto que ello es algo relativo, que dependerá del caso concreto). En caso necesario, la corrección de este problema implicará la utilización de tiempos de carga unitarios expresados en función del tamaño del lote.

2.A.5 CONSIDERACION DE LAS DEFECTUOSAS

Tal y como ya comentamos, los tiempos de carga calculados serán la base de una gran mayoría de técnicas de Planificación de Capacidad y proporcionarán resultados correctos para los volúmenes de producción programados, siempre y cuando no existan ítems defectuosos. Pero lo cierto es que, normalmente, en cada una de las operaciones que forman la ruta de un componente, o de un producto final, se obtiene una cierta proporción de ítems que no cumplen los requisitos de calidad. Esta proporción, expresada en tanto por uno, se denomina **Factor de Defectuosas (*d*)**[6] y su complementario (1-*d*), determina el **Factor de Aprovechamiento (*a*)**. En el caso de que cualquier operación tenga un $d > 0$, habría que corregir el TC_{jk} obtenido de acuerdo con la expresión [3], dado que la obtención de un **ítem «bueno»** originaría en la realidad más carga que la calculada (habría que incluir la que han generado las piezas defectuosas en cada una de las operaciones).

Supongamos que, en nuestro caso los d_i y a_i, son los que se detallan en la Tabla 2.6. De acuerdo con dichos datos, la Figura 2.5 muestra la incidencia de los factores de defectuosas en la obtención de una unidad de *M*.

Tabla 2.6. Datos de Operaciones, incluyendo defectuosas

Operación	tr_i	te_i	E_k	U_k	d_i	a_i
O1	0,5	0,414	0,92	0,9	0,05	0,95
O2	0,504	0,407	0,85	0,95	0,02	0,98
O3	0,26	0,23	0,95	0,93	0,1	0,9
O4	0,8	0,662	0,92	0,9	0,06	0,94

Es evidente, que los tc_{ijk}, seguirán teniendo el mismo valor. Así, el tiempo necesario del CT 3 para realizar una vez la Operación 3 de la ruta de *M*, tc_{3M3}, seguirá siendo de 0,268 h.e.; sin embargo, sí cambiarán los TC_{jk}. Así, dado que para obtener una unidad correcta de *M* en el CT_2 es necesario realizar la operación O2 el equivalente a 1,206 veces (ver Figura 2.5), el tiempo de carga correspondiente, TC_{M2} será:

$$TC_{M2} = \frac{tc_{2M2} \times 1}{(a_4 x a_3 x a_2)} = \frac{0{,}447 \times 1}{(0{,}94 \times 0{,}9 \times 0{,}98)} = 0{,}539 \text{ h.e.}$$

Para generalizar dicho cálculo, vamos a llamar v_i *al aprovechamiento de la operación i multiplicado por el producto de los aprovechamientos de cada una de las operaciones siguientes de su ruta*. Según esto:

$$v_4 = a_4 = 0{,}94$$
$$v_3 = a_3 \times a_4 = 0{,}846$$
$$v_2 = a_2 \times a_3 \times a_4 = 0{,}829$$
$$v_1 = a_1 \times a_2 \times a_3 \times a_4 = 0{,}787$$

Si llamamos A_j **al aprovechamiento de la ruta de *j***, éste sería igual al producto de los a_i de todas sus operaciones. Así por ejemplo, en la ruta de *M*, $Am = a_1 \times a_2 \times a_3 \times a_4 = 0{,}787$ que coincidirá con el v_i de la primera operación (v_1 en el caso de *M*). De esta forma, los TC_{jk} cambiarán su formulación anterior (expresión [3]), por la siguiente:

$$TC_{jk} = \sum_{i=n}^{m} tc_{ijk}/v_i \qquad [5]$$

De acuerdo con ello (ver Tabla 2.5):

$$TC_{M1} = \sum_{i=1}^{4} \left(\frac{tc_{iM1}}{v_i}\right) = \frac{tc_{1M1}}{v_1} + \frac{tc_{2M1}}{v_2} + \frac{tc_{3M1}}{v_3} +$$

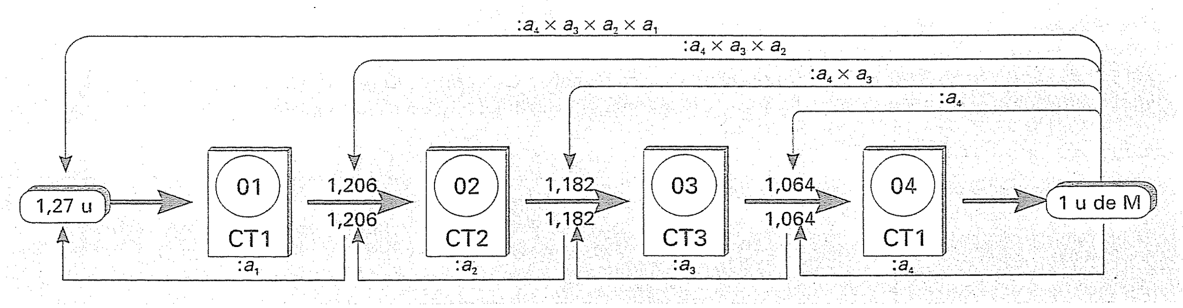


Figura 2.5. Incidencia de las defectuosas en la obtención de una unidad de *M*.

[6] Este factor también se representa mediante otras letras, tales como *w* y *p* (ver Capítulo 12).

$$+ \frac{tc_{4M1}}{v_4} = \frac{0,439}{0,787} + \frac{0}{0,829} + \frac{0}{0,864} + \frac{0,687}{0,94} = 1,289 \text{ h.e.}$$

$$TC_{M2} = \sum_{i=1}^{4} \left(\frac{tc_{iM2}}{v_i}\right) = \frac{tc_{1M2}}{v_1} + \frac{tc_{2M2}}{v_2} + \frac{tc_{3M2}}{v_3} +$$

$$+ \frac{tc_{4M2}}{v_4} = \frac{0}{0,787} + \frac{0,447}{0,829} + \frac{0}{0,864} + \frac{0}{0,94} = 0,539 \text{ h.e.}$$

$$TC_{M3} = \sum_{i=1}^{4} \left(\frac{tc_{iM3}}{v_i}\right) = \frac{tc_{1M3}}{v_1} + \frac{tc_{2M3}}{v_2} + \frac{tc_{3M3}}{v_3} +$$

$$+ \frac{tc_{4M3}}{v_4} = \frac{0}{0,787} + \frac{0}{0,829} + \frac{0,268}{0,864} + \frac{0}{0,94} = 0,317 \text{ h.e.}$$

Estos tiempos serían los que habría que emplear para calcular las cargas provocadas por la obtención de un cierto lote de tamaño Q. Al igual que antes (expresión [4]), la carga que generaría la obtención de 100 unidades de M en cada CT, sería igual:

$$CT1 \rightarrow TC_{QM1} = Q \times TC_{M1} = 100 \times 1,289 = 128,9 \text{ h.e.}$$
$$CT2 \rightarrow TC_{QM2} = Q \times TC_{M2} = 100 \times 0,539 = 53,9 \text{ h.e.}$$
$$CT3 \rightarrow TC_{QM3} = Q \times TC_{M3} = 100 \times 0,317 = 31,7 \text{ h.e.}$$

No obstante, con frecuencia, deberemos calcular la carga para un lote a emitir al CT, el cual incluirá ítems «buenos» y defectuosos (por ejemplo, pedidos planificados en MRP, ver Capítulo 4) en vez de para un lote a entregar (sólo ítems «buenos»). La diferencia viene dada por el hecho de que el lote a emitir sería igual al lote a entregar partido por el aprovechamiento de la ruta. Para un lote de 100 unidades de M, se habría calculado un lote a emitir:

$$\text{Lote a emitir} = Qe = \text{Lote a obtener}/A_M = 100/0,787 = 127 \text{ unidades}$$

En este caso, sería necesario calcular el TC_{jk}, tal y como hemos indicado en la expresión [5] y aplicarlo para calcular la carga en los CT. Supuesto un lote a emitir de tamaño Qe tendríamos:

$$TC_{Qej_k} = Qe \times TC_{jk} \times A_j \qquad [4']$$

De esta forma, el total calculado no variaría, ya que:

$$TC_{Qej_k} = Qe \times TC_{jk} \times A_j = \frac{Q}{A_j} \times TC_{jk} \times A_j = Q \times TC_{jk}$$

manteniéndose así el mismo valor obtenido para la expresión [4].

REFERENCIAS Y BIBLIOGRAFIA

ADAM, E. E., y EBERT, R. J.: «Production and Operations Management: Concepts, Models and Behavior», Prentice-Hall International, 1992.

APICS: «APICS Dictionary», 1984.

BILLINGTON-MCLAIN-THOMAS: «Mathematical Programming Approaches to Capacity-Constrained MRP Systems: Review, Formulation and Problem Reduction», *Management Science*, vol. 29, núm. 10, octubre 1983.

BROWNE-HARHEN-SHIVNAN: «Production Management Systems. A CIM Perspective», Addison-Wesley Publishing Co. 1988.

CASTANYER FIGUERAS, F.: «Control de métodos y tiempos», Colección Productiva, Marcombo Boixareu Editores, 1988.

CONLON, J. R.: «Is Your Master Production Schedule Feasible?», Master Production Scheduling Reprints, APICS, 1982 [8].

DILWORTH, B.: «Production and Operations Management: Manufacturing and Services», McGraw-Hill, 1993.

GAITHER, N.: «Production and Operations Management», The Dryden Pres International, 1992.

GARCÍA GONZÁLEZ, S., y DOMÍNGUEZ MACHUCA, J. A.: «La gestión integrada de la empresa y el papel de los Sistemas MRP», *Alta Dirección*, núm. 155, 1991.

GARCÍA GONZÁLEZ, S., y GARCÍA GRAGERA, J. A.: «Medición de la Capacidad en configuraciones productivas por funciones: los tiempos de carga unitarios», *Alta Dirección*, números 186 y 187, 1994.

HABLEWITZ, O.: «Shop Floor Control Training Aid APICS», APICS, 1980.

HARMON, ROY L.: «Reinventing The Factory II: managing the World Class Factory», The Free Press, 1992.

HEIZER, J., y RENDER, B.: «Production and Operations Management», Allyn and Bacon, 1991.

HOPEMAN, R.: «Administración de Operaciones», CECSA, 1990.

HOYT, J.: «Determining dynamic lead times for manufactured parts in a job shop» en *Computer in Manufacturing Execution and Control System*, Auerbach Publishers, 1983.

HUGE, E. C.: «La gestión de los plazos de suministro y de gestión», *Harvard-Deusto Business Review*, 2.° trimestre, 1980.

KHAN, M. B.: «Production Plan For Serial Process With Yield Loss», *Industrial Engineering*, julio 1987.

KRAJEWSKI-RITZMAN: «Operations Management: strategy and analysis», Addison Wesley, 1990.

MACHUCA, J. A. D.; DURBAN, S., y MARTIN, E.: «El Subsistema Productivo de la Empresa», Pirámide, 1990.

MACHUCA, J. A. D.; ALVAREZ, M. J.; GARCÍA, S.; DOMÍNGUEZ, M. A., y RUIZ, A.: «Dirección de Operaciones: Aspectos estratégicos en la producción y en los servicios», Ed. McGraw-Hill, 1994

MATHER, H.: «Competitive Manufacturing», Prentice Hall Bussiness Classics, 1988.

MEREDITH, J. R.: «The Management of Operations: a conceptual emphasis», John Wiley and Sons, 1992.

MCCLAIN-THOMAS-MAZZOLA: «Operations Management: production of goods and services», Prentice Hall, 1992.

MUHLEMANN, A.; OACLAND, J., y LOCKYER, K.: «Production and Operations Management», Pitman Publishing Co. 1992.

MURDICK-RENDER-RUSSELL: «Service Operations Management», Allyn and Bacon, 1990.

O.I.T.: «Introducción al Estudio del Trabajo», O.I.T., 1977.

PLOSSL, G. W.: «Manufacturing Control. The Last Frontier for Profits», Reston Publ. Co., 1973.

PLOSSL, G. W.: «Production and Inventory Control Applications», George Plossl Educational Services, 1983.

PLOSSL, G. W.: «Managing in the New World of Manufacturing», Prentice Hall, 1991.

RICE, D. R.: «Theoretical Capacity: Is It Real?», 33 rd International Conference Proceedigs. APICS, 1990.

SCHROEDER, R. G.: «Administración de Operaciones», McGraw-Hill, 1992.

SCHOEDER, R. G.: «Operations Management», McGraw-Hill, 1993.

STARR, M. K.: «Managing Production and Operations», Prentice Hall, 1989.

STEVENSON, William J.: «Production/Operations Management», Irwin, 1990.

VOLLMANN-BERRY-WHYBARK: «Sistemas de Planificación y Control de Producción», vol. I, Tecnologías de Gerencia y Producción, 1991.

VOLLMANN-BERRY-WHYBARK: «Manufacturing Planning and Control Systems», The Dow Jones-Irwin/APICS Series in Production and Inventory Management, 1988.

WATERS, C. D. J.: «An Introduction to Operations Management», Addison Wesley, 1991.

WEMMERLÖV, U.: «Capacity Management Techniques», APICS, 1984/1.

WEMMERLÖV, U.: «Case Studies in Capacity Management», APICS, 1984/2.

CAPITULO 3

PLANIFICACION AGREGADA Y PROGRAMACION MAESTRA DE LA PRODUCCION

3.1. INTRODUCCION A LA PLANIFICACION AGREGADA DE LA PRODUCCION

Como ya vimos en el Capítulo 1, la **Planificación Estratégica** implica, entre otras cosas, la generación de un **Plan Comercial o Plan de Ventas a Largo Plazo**, calculado a partir de la demanda prevista y de los objetivos empresariales para dicho horizonte temporal. Este plan marca las cantidades a vender, las cuales, una vez realizados los ajustes necesarios, teniendo en cuenta la capacidad y los objetivos estratégicos, constituirán el **Plan de Producción a Largo Plazo**, que puede alterar el Plan de Ventas inicialmente previsto. A partir de los mencionados planes se generará el **Plan Financiero a Largo Plazo**, cuya elaboración puede traer consigo modificaciones en los dos planes anteriormente citados. El conjunto formado por estos tres planes constituye la base del **Plan Estratégico o Plan de Empresa**; aprobado éste, la Dirección de Operaciones será la responsable del Plan de Producción a Largo Plazo. Para desarrollarlo, deberá pasarse a nivel táctico y concretar dicho plan para el medio plazo mediante la elaboración del denominado **Plan Agregado de Producción**[1]; éste puede considerarse como *la misión a cumplir por el Departamento de Operaciones para apoyar la consecución del Plan de Empresa*. Las relaciones 1 a 12 de la Figura 3.1[2] reflejan lo hasta aquí expuesto.

Para llegar al Plan Agregado habrá que tener en cuenta, por una parte, las cantidades anuales (de los tipos de productos) del Plan de Producción, que deberán descomponerse en cifras mensuales o trimestrales (relación 13) y, por otra, las previsiones de demanda a corto y medio plazo y la cartera de pedidos (relación 14). Habrá que considerar, además, otras posibles fuentes de demanda (relación 15) para, en conjunto, obtener las necesidades mensuales totales de producción agregada (en unidades de familias de producto). La posterior desagregación de dichas cantidades para periodos de tiempo más cortos llevará a la obtención del **Programa Maestro de Producción** (en unidades de productos), con lo que comenzará la Planificación Operativa (relación 16).

Si bien la consideración de la capacidad para el Plan a Largo Plazo (ver Capítulo 2) ha debido dar lugar a la existencia de disponibilidades anuales suficientes, no debemos olvidar que se trata de cantidades agregadas para el año y que ello no garantiza en absoluto que ocurra lo mismo en cada uno de los meses

[1] La denominación de Plan Agregado de Producción *(Aggregate Production Plan)* es sin duda la más extendida. Algunos autores suelen emplearla indistintamente con las de Plan de Producción *(Production Plan)* o Plan de Producción a Medio Plazo *(Medium-Range Production Plan)*.

[2] Tomada de J. A. D. Machuca y otros (1994, Capítulo 3).

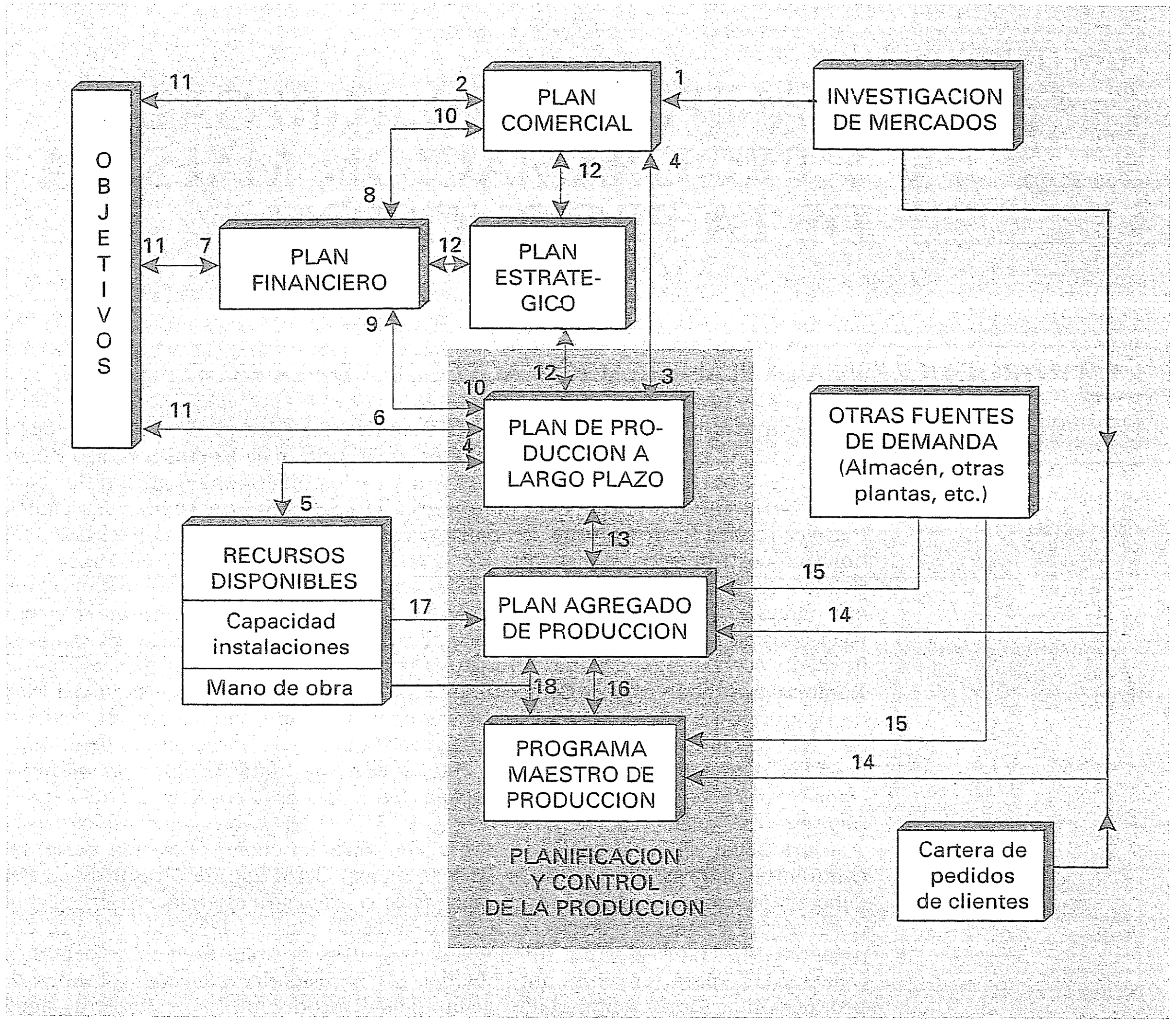


Figura 3.1. Del Plan de Empresa al Programa Maestro de Producción (diagrama simplificado).

que integran el Plan Agregado. Ello es debido a que, normalmente, las necesidades calculadas de producción no serán constantes mes a mes, aunque su suma, para cada año, coincida con las del Plan a Largo. Por tanto, habrá que hacer viable el Plan a Medio Plazo en relación con la capacidad; a este nivel no podrán tomarse acciones estructurales de ajuste, sino solamente medidas transitorias, tales como realización de horas extras, subcontratación, etc. (relaciones 17 y 18). También, para cierto tipo de productos, puede optarse por producir en exceso en épocas de necesidades bajas y emplear el inventario así acumulado en épocas de necesidades altas, con el consiguiente aumento del coste de posesión de inventa-

rios. Otra opción, en este último caso, si el cliente lo permite, es servir con retraso parte de los pedidos recibidos en períodos de falta de capacidad; ello también conlleva costes, algunos de los cuales son de difícil estimación. En definitiva, las alternativas son numerosas y pueden dar lugar a distintas implicaciones económicas y de otro tipo (ver Apartado 3.3).

La íntima relación existente entre la planificación de la producción y la de capacidad lleva a muchos autores[3] a considerar que la planificación agregada de producción incluye a la de capacidad, no distinguiendo entre ambos planes, al menos en lo referente a volúmenes de mano de obra. Gaither (1992, pág. 342 y siguientes), por ejemplo, lo define como «el proceso de idear un plan que proporcione la capacidad de producción necesaria para soportar las previsiones de venta a medio plazo». Sin embargo, aunque los correspondientes procesos pueden efectuarse simultáneamente en gran número de casos, en otras ocasiones puede resultar muy complejo considerar todas las variables decisionales determinantes de la capacidad junto con las limitaciones procedentes de equipos e instalaciones. El Apartado 3.2 nos introducirá en esta compleja problemática.

Dos aspectos de importancia, en relación con el Plan Agregado de Producción que aún no hemos abordado, son las **unidades de medida a emplear** y el **horizonte de planificación** que debe abarcar, los cuales comentaremos someramente a continuación.

En relación con las unidades de medida, ha de tenerse en cuenta que el Plan Agregado debe servir, entre otras cosas, para facilitar la comunicación y coordinación entre la Alta Dirección y el Departamento de Producción, así como entre este último y el resto de las áreas funcionales. Debido a ello, es importante que las unidades empleadas sean significativas y agregadas, de forma que el Plan Agregado sea manejable y fácilmente comprensible por los distintos directivos de la firma. Parece claro que la unidad de medida más empleada es la **familia de productos**; este tipo de unidades agregadas debe permitir trabajar con un número de ellas que, de acuerdo con la experiencia, debería estar comprendido entre 5 y 15[4]. Esto simplifica el proceso de planificación y permite una mayor exactitud en la previsión, a la vez que reduce su coste y el esfuerzo necesario (ver Capítulo 1, Apartado 1.5).

En cuanto al **horizonte de planificación** y a los períodos o **«cubos» de tiempo** en que éste se subdivide, se dan opiniones no totalmente coincidentes por parte de distintos autores. Sin embargo, puede decirse que, generalmente, se acepta un horizonte comprendido entre 6 y 18 meses, periodificados en meses o trimestres. Lo cierto es que no existe un valor de aplicación general para cualquier caso; en nuestra opinión, es claro que el horizonte de planificación del Plan Agregado debe permitir conectar el Plan a Largo Plazo con el Programa Maestro de Producción. Por tanto, normalmente, siempre deberá ser mayor o igual que el de este último (que viene condicionado a su vez por múltiples factores (ver Apartado 3.6)) y, por otra, deberá cubrir un período representativo del Plan a Largo. Serán las posibilidades de la empresa para permitir la concreción de la información de este último para un cierto período las que marquen su longitud máxima (aquí, la calidad de las previsiones y la estabilidad del entorno constituirán

[3] Ver, por ejemplo, Stevenson (1990, pág. 466 y ss.), Gaither (1992, pág. 342 y ss.), Heizer y Render (1991, pág. 532, y ss.).

[4] Así, Samsung España indica de la siguiente forma sus ventas en el mercado español: Televisión, 138.000 unidades; vídeo, 100.000 unidades; microondas, 70.000 unidades; videocámaras, 5.200 unidades; aire acondicionado, 7.500 unidades (*Actualidad Económica*, núm. 1872, 1-V-1994).

factores básicos). En cuanto a los cubos de tiempo parece haber coincidencia en asignarles un valor mensual siempre que ello sea posible; si la información disponible no lo permite puede optarse por períodos trimestrales.

De lo hasta aquí expuesto, puede deducirse que el establecimiento del *Plan Agregado de Producción* es altamente complejo, viniendo *condicionado por múltiples factores*, tales como las distintas fuentes generadoras de la demanda, los objetivos estratégicos, las disponibilidades de recursos materiales y financieros, etcétera. Podemos definirlo, pues, como un *Plan de Producción a Medio Plazo, factible desde el punto de vista de la capacidad, que permita lograr el Plan Estratégico de la forma más eficaz posible en relación con los objetivos tácticos del Subsistema de Operaciones.*

Por otra parte, hemos podido apreciar sus funciones básicas, tales como:

- Permitir la conexión y comunicación del Departamento de Operaciones con la Alta Dirección y con el resto de las Areas Funcionales.
- Ser el origen del proceso de planificación y control de producción a desarrollar por la Dirección de Operaciones.
- Ser uno de los instrumentos de control del Plan Estratégico, en cuyo marco las distintas áreas acuerdan, en términos agregados, lo que va a producirse y lo que va a estar disponible para la venta.

En el caso de las **empresas de servicios**, la problemática de la planificación agregada es análoga, con algunas excepciones que se irán comentando a lo largo del presente capítulo. Una de ellas viene dada por la mayor importancia que en el desarrollo de los procesos productivos de estas firmas suele tener la mano de obra en relación con el equipo fijo, siendo la primera la que suele marcar las disponibilidades de capacidad. Otro aspecto de interés es el hecho de que, a nivel agregado, los volúmenes de prestación de servicios se miden a menudo, a partir de los *inputs*, en horas de mano de obra, por lo que el Plan Agregado resultante expresaría las necesidades agregadas de personal. De ahí la frecuente denominación de **Plan de Personal** (*Staffing Plan*), aunque también se utiliza la denominación de **Plan de Operaciones** (*Operations Plan*).

3.2. UN EJEMPLO SENCILLO DE PLANIFICACION AGREGADA

Dada la complejidad que entraña el proceso de planificación agregada estimamos conveniente introducir un ejemplo simplificado que puede servir para captar de forma global la problemática objeto de estudio; ello facilitará la comprensión de los epígrafes que siguen (véase Ejemplo 3.1).

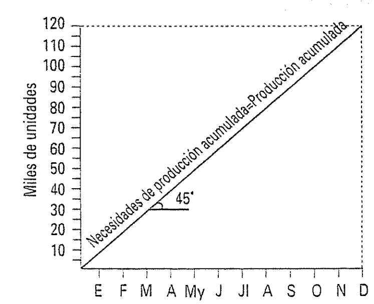
Hemos visto cómo las consecuencias en cuanto a costes y otros objetivos varían en función de las alternativas elegidas. Resulta obvio que, además de las aquí planteadas, existe un amplio abanico de posibilidades que aumentan la complejidad del problema (por ejemplo, utilización de horas extras, de subcontratación, de tiempos ociosos, etc.). A esto se une el que, en general, existirá más de una familia de productos, más de un tipo de mano de obra, distintos tipos de instalaciones, etc. Es evidente, pues, que en el problema que acabamos de abordar intervienen numerosos factores y pueden existir múltiples soluciones. A aclarar este tema y a comentar algunas de las técnicas que es posible emplear para buscar un Plan Agregado que, si no óptimo, sea al menos satisfactorio, dedicaremos los próximos apartados.

EJEMPLO 3.1. Determinación simplificada de planes agregados

Supongamos una empresa que fabrica *una única familia de productos*, siendo necesaria *una hora estándar (h.e.) para elaborar una unidad de la misma. Cada operario* desarrolla un promedio de *100 horas mensuales*, y consideraremos que cada mes tiene el mismo número de días productivos y que la *plantilla inicial* es de 100 trabajadores. No quedan *pedidos pendientes de servir* y el *inventario inicial* es de *500 unidades, igual al stock de seguridad* que la firma desea mantener durante todo el año para hacer frente a posibles desviaciones respecto a las previsiones. *No existen problemas de capacidad en el equipo fijo.*

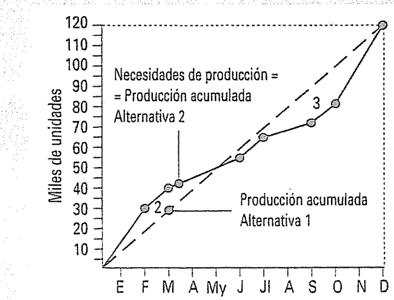
Vamos a imaginar inicialmente que las *necesidades de producción* a satisfacer son de *120.000 unidades por año* y que se distribuyen de forma homogénea a lo largo del mismo. Dado que no existen otras fuentes de demanda, tales como ajustes de inventario, de la cartera de pedidos, etc, las necesidades a cubrir alcanzan una cifra de 10.000 un/mes. A dicha cantidad se le puede hacer frente con la plantilla disponible, pues 100 (trabajadores) × × 100 (h.e./mes y trabajador) × 1 (un./h.e.) = 10.000 un./mes. Dada la coincidencia de ambas cifras, las ventas se satisfarían totalmente en la fecha deseada y los inventarios permanecerían constantes é iguales al stock de seguridad, no produciéndose, por tanto, costes por retraso en la entrega o por sobrealmacenamiento. Tampoco sería necesario variar la plantilla, por lo que no se incurriría en costes de contrataciones o/y despidos.

Vamos a utilizar unos ejes coordenados, en los que las ordenadas van de 0 a 120.000 un. a intervalos de 10.000 un. y en las abscisas aparecen los 12 meses del año. En las mencionadas circunstancias, las representaciones gráficas de las necesidades de producción acumuladas y de la producción mensual coincidirían en una misma recta que, partiendo del origen, formaría 45° con ambos ejes (ver Figura 3.2*a*) y representaría el Plan Agregado.



Meses	E	F	M	A	My	J	Jl	A	S	O	N	D
Necesidades de producción	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10
Necesidades acumuladas	10	20	30	40	50	60	70	80	90	100	110	120
Plan agregado	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10

Figura 3.2*a*. Necesidades mensuales constantes e iguales a la producción (en miles).



Meses	E	F	M	A	My	J	Jl	A	S	O	N	D
Necesidades de producción (Alternativa 2)	15	15	10	5	5	5	10	5	5	10	15	20
Alternativa 2 (acumulada)	15	30	40	45	50	55	65	70	75	85	100	120
Alternativa 1	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10
Alternativa 1 (Acumulada)	10	20	30	40	50	60	70	80	90	100	110	120

Figura 3.2*b*. Necesidades mensuales variables (en miles) y dos alternativas de Plan Agregado.

Figura 3.2. Gráficos de producción y necesidades acumuladas.

Sin embargo, lo normal es que la demanda mensual no sea constante y presente variaciones más o menos acusadas, con lo cual el problema se complica. Para comprobarlo vamos a suponer que las necesidades de producción siguen la evolución que aparece en los datos numéricos y gráficos de la Figura 3.2*b*, característicos de un comportamiento estacional.

Dado que el total acumulado (120.000 un.) coincide con el del caso anterior, podríamos plantearnos un Plan Agregado (alternativa 1) idéntico al allí utilizado, es decir, una producción mensual constante e igual a 10.000 un./mes; con éste no se incurría tampoco en costes de contrataciones y despidos. Ahora bien, si observamos, numérica o gráficamente, la evolución de ambas funciones en la Figura 3.2*b*, podremos observar que, desde enero a abril, la producción planificada no es suficiente para hacer frente a las necesidades. Debido a ello, automáticamente se producirán retrasos en la entrega y, con ello, costes y pérdidas en el nivel de servicio al cliente[5]. Dicho desajuste se equilibra en mayo y, a partir de este mes, las necesidades invierten su comportamiento y la producción pasa a exceder a estas últimas; precisamente la distancia entre ambas líneas es inventario en exceso, que, tras sufrir distintas fluctuaciones, se anula en diciembre. En esta zona del año se estará incurriendo en costes de posesión.

Un Plan Agregado que eliminaría los problemas y costes mencionados (alternativa 2) sería aquel que ajustase la producción a las necesidades, con lo cual coincidirán sus respectivos gráficos (ver Figura 3.2*b*). Ello no implica que dicho plan esté exento de efectos indeseables; por ejemplo, imaginemos que se realiza el mencionado ajuste a través de cambios en el nivel de la mano de obra, contratando, cuando falta, producción y despidiendo en caso contrario. De esta forma, no sólo se provocarían costes por contrataciones y despidos, sino otro tipo de inconvenientes que, no por menos cuantificables, son menos importantes (ver Cuadro 3.1. en Apartado 3.3).

3.3. LA OBTENCION DEL PLAN AGREGADO: POSIBILIDADES DE ACTUACION Y FACTORES A CONSIDERAR

A la hora de establecer el Plan Agregado y responder con la producción a las necesidades de productos finales, derivadas fundamentalmente de la demanda prevista, suelen plantearse dos posibilidades:

a) **Actuar sobre la demanda**, en general, para hacerla subir en aquellos períodos en que es inferior a la capacidad de la firma y disminuir cuando ocurra lo contrario, normalmente, para intentar transferirla a los períodos de baja demanda. Ello puede conseguirse a través de acciones comerciales tales como promoción, disminución de precios[6], generación de nuevos productos con ciclos de demanda complementarios a los existentes, servir con retraso y, así, desplazar la satisfacción de la demanda, etc. Esta **opción** suele denominarse **activa** o **agresiva**.

b) **Actuar sobre la capacidad**, aumentándola o disminuyéndola, para adaptarse a la demanda mediante medidas de ajuste transitorio, las cuales fueron consideradas en el capítulo anterior; las más habituales aparecen en el Cuadro 3.1 junto con algunas de sus ventajas e inconvenientes. Debe recordarse que, normalmente, suele existir un cierto **colchón de capacidad** para hacer frente a faltas coyunturales de la misma (ver J. A. D. Machuca y otros, 1994, Apartado 7.3.2). Otra posibilidad, cuando sea posible almacenar el producto, es producir más en períodos de exceso de capacidad

[5] Estos retrasos serán más o menos largos en función de los valores relativos de los costes derivados de las rupturas y de los costes provocados por la posesión de inventario en exceso, así como de la importancia que la Dirección otorgue al objetivo de servicio al cliente en relación con el de costes.

[6] Piénsese en las tarifas especiales de compañías aéreas, días azules de RENFE, precios especiales de fin de semana en Hoteles, etc.

Cuadro 3.1. Algunas medidas de ajuste transitorio de capacidad

Opción	Posibles ventajas	Posibles inconvenientes	Costes
Modificar volumen de mano de obra: contrataciones y despidos.	— Evita los tiempos ociosos y acumulaciones de inventario y horas extras.	— Limitaciones legales y de convenios colectivos. — Causan malestar en trabajadores y sindicatos: aumento de conflictividad. — Poco viable si la mano de obra es muy especializada. — Es necesaria alta capacidad de formación. — Puede reducir la productividad.	— CONTRATACION ° Anuncios de ofertas. ° Pruebas de selección. ° Trabajo administrativo. ° Formación y entrenamiento. ° Mayor cantidad de desechos iniciales. ° Caída de productividad. — DESPIDOS ° Indemnizaciones. ° Trabajo administrativo. ° Conflictividad.
Utilización de horas extras	— Es una opción menos drástica y evita costes de contrataciones y despidos. — Evita la acumulación de inventarios y los retrasos en el servicio sin variar la mano de obra.	— Limitaciones legales y de convenio. — El trabajador no está obligado a aceptarlas. — Su uso ha de ser limitado, so pena de efectos negativos sobre motivación, calidad, productividad, accidentes, etc.	— Mayor coste de las horas extras. — Costes derivados de menor productividad. — etc.
Tiempos ociosos	— Si la disminución de capacidad es corta, es más barato que el despido. — Evita los efectos negativos de los despidos. — Permite conservar a los trabajadores cualificados y eficientes. — Evita acumular inventarios innecesarios.	— El trabajador sigue percibiendo su remuneración. — Baja la eficiencia en el uso del equipo fijo.	— Salarios y cargas sociales. — Penalización por el desaprovechamiento de la capacidad.
Subcontratación	— No implica realizar inversiones adicionales. — Evita la sobreutilización del equipo fijo. — No tiene limitaciones legales o de convenio. — Evita el sobrecoste de las contrataciones y horas extras. — No motiva posteriores despidos.	— Riesgo de pérdida de clientes caso de subcontratar el producto final. — Falta de disponibilidad de empresas subcontratadas. — Pérdida del control de parte del proceso productivo. — El coste suele ser superior al de la empresa.	— Precio cobrado por la empresa subcontratada. — Penalizaciones por riesgo de pérdida de calidad y de clientela.
Programación vacaciones	— Reduce la mano de obra sin coste adicional y sin otros riesgos.	— Condicionadas por las limitaciones legales y de convenio colectivo.	— Ninguno adicional.

y utilizar el inventario en exceso en las épocas de sobrecarga. Ello implicaría lógicamente un incremento de los costes de posesión (ver Capítulo 4). Este tipo de acciones son llamadas **pasivas** o **reactivas**.

Normalmente, la mayor parte de las opciones englobadas bajo la denominación de **activas** no suelen tomarse en esta fase de la planificación, sino, más bien a nivel estratégico y en el área comercial, por lo que supondremos que ya han sido utilizadas. A pesar de ello, sigue quedando un amplio abanico de posibilidades de actuación que incluyen las del apartado *b*) y algunas del *a*), como, por ejemplo, servir con retraso; la aplicación de las mismas puede requerir la coordinación de la Función de Operaciones con otras áreas tales como Márketing o Personal. Ello desembocará en la determinación de la estrategia a utilizar.

Algunos autores (Heizer y Render, 1991, págs. 535-536) denominan **estrategias puras** a aquellas que *actúan sobre una única variable de entre las mencionadas* (por ejemplo: contratar/despedir, subcontratar, etc.) y **estrategias mixtas** a las que *emplean una combinación de las mismas*. Otros (por ejemplo: Stevenson (1990, páginas 474-475) o Krajewski y Ritzman, 1990, págs. 489-490), sin embargo, reservan la denominación de **puras** para *aquellas que se caracterizan por un único objetivo*. Siguiendo este último criterio, podemos distinguir:

- **Estrategia de caza**, cuya meta es ajustarse a la demanda. Se persigue, pues, que la producción planificada satisfaga las necesidades período a período (fue lo que se hizo en la alternativa 2 del Ejemplo 3.1.). Para ello pueden utilizarse diversas vías, tales como contrataciones, despidos, realización de horas extras, subcontratación, etc. Debido a ello, esta estrategia participará de las ventajas e inconvenientes de las opciones empleadas para conseguir el propósito que la guía (ver Cuadro 3.1). Por otra parte, una característica básica y positiva de esta alternativa es la de intentar conseguir flexibilidad frente a los cambios de demanda y mantener un bajo nivel de inventarios, pues esta última variable no suele ser utilizada como instrumento; un aspecto negativo es la inestabilidad que genera en la producción, con todo lo que ello conlleva.
- **Estrategia de nivelación**, que puede ser de **dos tipos**, según se persiga **mantener constante la mano de obra o la producción total por período**. En el primer caso, lo fundamental es dejar invariable la producción regular por período (derivado del trabajo en jornada regular), aunque, para hacer frente a variaciones en las necesidades, la producción total puede cambiar a través de distintas opciones, tales como contratación eventual, retrasos en la entrega[7], horas extras, etc. En el segundo caso, lo que permanece inalterable es la producción total por período, y las variaciones en las necesidades se absorben a través de los inventarios, subcontratación o retrasos en la entrega (fue lo que hicimos con la alternativa 1 del Ejemplo 3.1).

Como veremos en el capítulo dedicado al *Just-in-Time*, muchas empresas japonesas, como Toyota o Nissan, optan por este último tipo de estrategia. Su filosofía es que un nivel de empleo estable da lugar a mayor calidad, menor rotación, menor absentismo y mayor identificación de los empleados con los objetivos de la compañía. Las **empresas de servicios** tienen un menor número de posibilidades de actuación, pues, por su naturaleza, no pueden emplear algunas de las vías mencionadas (por ejemplo: inventarios, servicios con retraso)[8]. En

[7] Respecto a los costes derivados de esta opción, ver, en Capítulo 1, los costes de ruptura.

[8] En el Apartado 3.6 se comentan algunas excepciones.

cuanto a las ventajas y desventajas de esta vía, dependerán de las opciones empleadas para afrontar las fluctuaciones en la demanda y de las que se derivan de no usar otras (ver Cuadro 3.1). En relación con la nivelación del flujo de producción total, algunas posibles ventajas que no aparecen en las páginas anteriores son:

- Mejores precios de los proveedores por la constancia en el suministro de materia prima.
- Incrementos en la productividad de mano de obra, equipos y materiales.
- Simplificación de la supervisión y el control de la actividad productiva.
- Etc.

En la práctica suelen utilizarse más bien **estrategias mixtas**, que engloban más de una de las anteriores. Esto da mayor flexibilidad pero, al mismo tiempo, complica el problema de la planificación agregada debido al mayor número de posibles planes alternativos. Dada la naturaleza y funciones del Plan Agregado (ver Apartado 3.1.), la **elección del plan más adecuado** deberá tener en cuenta, al menos, los siguientes **factores**:

- Las **limitaciones del entorno**, las cuales actúan como restricciones. Así, por ejemplo, las derivadas del marco legal laboral.
- Las **políticas de la empresa**, que, situándose a un nivel superior, deben constituir el marco de referencia y restringir las posibles opciones. Como ejemplo podríamos citar la no utilización de tiempos ociosos, la limitación en el número de horas extras o evitar las variaciones en la mano de obra.
- Los **costes** derivados de las distintas alternativas. Los más relevantes son los que, en su caso, pueden derivarse de:
  - La mano de obra en jornada regular.
  - Las horas extras.
  - Los tiempos ociosos.
  - Las posibles contrataciones y despidos.
  - La subcontratación.
  - El inventario almacenado.
  - El retraso en el servicio.
- La **satisfacción del cliente**, medida, por ejemplo, a través de la calidad del producto y del cumplimiento de plazos.

Debido a que los dos primeros factores actúan básicamente como restricciones, la actividad de planificación agregada va a consistir normalmente en encontrar aquel plan que, satisfaciendo aquéllas, dé lugar a un coste y servicio al cliente adecuados (ver Apartado 3.5.1).

A la hora de evaluar los distintos planes factibles, es interesante hacer notar que el conjunto de la producción para el horizonte de planificación elegido es el mismo para cualquier plan, y que todos ellos coincidirán en lo que podríamos denominar **coste básico de producción** (por tal se entiende aquel que no depende de la opción elegida para adecuar producción y necesidades). Entre sus componentes podemos citar el de materiales, seguros, mantenimiento de instalaciones, amortización de equipos, etc. Así pues, cuando se trata de evaluar un plan a efectos de comparación con otros, ni siquiera será necesario calcular el coste básico, sino únicamente el coste incremental que la alternativa en cuestión implicará sobre aquél.

3.4. EL PROCESO DE PLANIFICACION AGREGADA

Lo expuesto en los apartados anteriores permite apreciar la complejidad del proceso de planificación agregada; como hemos visto, ello implica:

1. **Determinar las cantidades a producir** mensual o trimestralmente para el horizonte de planificación considerado.
2. **Hacer un plan factible**, es decir, que pueda ser ejecutado. Para ello habría que establecer las correspondientes medidas de ajuste transitorio de capacidad/demanda, siendo necesario determinar, por período, el valor de las distintas variables utilizadas. Dichas medidas deberían ser compatibles con las limitaciones marcadas por el entorno y por la política de la empresa.
3. **Facilitar la consecución del Plan Estratégico**, para lo cual deberá responder a las necesidades de producto derivadas del Plan de Producción a Largo Plazo, de las previsiones de venta a medio y corto plazo, de la cartera de clientes y de otras posibles fuentes de demanda.
4. **Lograr la mayor eficacia posible** en relación con los objetivos tácticos. Tras cumplir lo expuesto en los párrafos anteriores, esta nueva condición llevará a intentar lograr los mejores niveles posibles de servicio al cliente (calidad, plazos, etc.).

Es fácil deducir que no existe técnica capaz de resolver el problema planteado considerando simultáneamente todos los aspectos mencionados. Ello lleva, en la práctica, a seguir las siguientes fases (ver Figura 3.3):

a) Calcular las necesidades de producto para cada uno de los períodos del horizonte de planificación de acuerdo con el punto 3.
b) Determinar las posibles opciones de ajuste transitorio y sus límites de empleo.
c) Elaborar varios planes de producción alternativos.
d) Evaluar dichos planes en relación con los objetivos planteados, normalmente coste y cumplimiento de demanda.
e) Si no se obtiene un plan satisfactorio, seleccionar el que mejor cumpla los objetivos y volver a la fase *c*) tomándolo como origen de los nuevos planes alternativos.
f) Seguir el proceso hasta la obtención de un Plan Agregado satisfactorio.

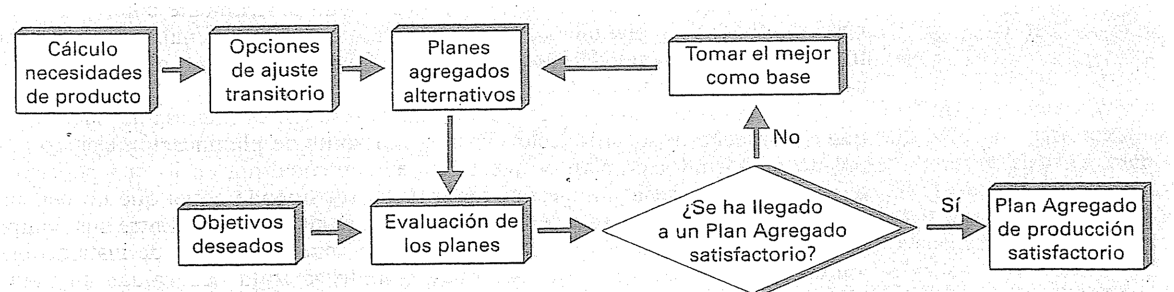


Figura 3.3. Fases en la determinación del Plan Agregado de Producción.

Debido a la dificultad del proceso mencionado, suele elaborarse un **Plan Matriz** a partir del cual se obtienen diversos planes alternativos mediante variaciones en la estrategia que lo sustenta. La obtención de dicho Plan Matriz y de sus derivados puede realizarse mediante diversas técnicas que resuelven el problema o, al menos, racionalizan el proceso, aunque, como veremos en el próximo apartado, ninguna de ellas ha resuelto el problema en su plenitud.

Por otra parte, hay que ser conscientes de que, una vez elaborado, el Plan Agregado necesitará ser actualizado cuando ello sea necesario, pues, en caso contrario, se correrá el riesgo de que deje de ser representativo de la realidad. Son múltiples las causas que pueden dar lugar a la necesidad de puesta al día: la demanda real puede variar respecto a la prevista, la mano de obra puede trabajar con una productividad distinta a la supuesta, la cantidad de producción planificada para un cierto mes puede no ser obtenida, etc. Estos y otros acontecimientos inesperados pueden ser tenidos en cuenta recalculando el Plan Agregado de acuerdo con la nueva información. Evidentemente, el Programa Maestro de Producción que de él deriva también sufrirá las alteraciones correspondientes a los cambios acaecidos.

3.5. TECNICAS PARA LA PLANIFICACION AGREGADA

Los múltiples modelos que han sido elaborados para llevar a cabo la planificación agregada pueden clasificarse en tres grupos fundamentales:

a) **Intuitivos o de «prueba y error»**, que constituyen la aproximación más utilizada en la práctica y a los que, por dicha razón, dedicaremos mayor atención.
b) **Analíticos**, que se basan en modelos matemáticos de dos tipos:
   — Basados en la programación matemática, los cuales pretenden encontrar una solución «óptima».
   — Heurísticos, que persiguen llegar a una solución juzgada satisfactoria.
c) **De simulación**, normalmente por ordenador, en los que se prueban múltiples soluciones, las cuales se van mejorando mediante determinadas reglas de búsqueda.

3.5.1. La técnica de prueba y error mediante gráficos y tablas

Como se indicaba en el Apartado 3.4, para llegar a una solución satisfactoria, se tomará como punto de partida uno o varios planes, los cuales pueden elaborarse, bien a partir de resultados o experiencias pasados[9], bien en base a algunas políticas simples. A partir de ellos, se irán probando diversas mejoras con objeto de intentar reducir los costes hasta llegar a obtener un Plan Agregado aceptable. Dada la inexistencia de un proceso sistematizado para desarrollar esta técnica y el elevado número de variables y cálculos a realizar, este procedimiento suele apoyarse en gráficos y tablas que permiten ordenar los resultados y el

[9] Ver, por ejemplo, McLain y otros (1992, pág. 147) para la utilización de curvas de experiencia para este propósito. Hay que indicar también que, antes de utilizar la experiencia pasada con este fin, habrá que asegurarse de que sigue siendo representativa en el futuro que se pretende planificar.

proceso de valoración de los distintos planes. Con objeto de comprender más fácilmente la técnica de prueba y error, utilizaremos un ejemplo concreto y simplificado.

EJEMPLO 3.2. Planificación Agregada mediante tablas

Vamos a trabajar con una hipotética empresa que fabrica una única familia de productos. La obtención de cada unidad de dicha familia requiere 1,5 horas estándar (h.e.) de mano de obra y cada operario desarrolla, por término medio, 8 h.e. diarias. En el momento actual, diciembre, la plantilla de la empresa está formada por 150 trabajadores (50 fijos y 100 eventuales) y, aunque el stock de seguridad deseado es de 500 unidades, el stock disponible de productos es nulo.

La Tabla 3.1. puede clarificar el **cálculo de las necesidades mensuales de producción**. La primera fila nos muestra la previsión de demanda para el año próximo, obtenida de la investigación comercial; dicha previsión deberá corregirse de acuerdo con la información contenida en la cartera de clientes (filas 2 y 3) y con otras posibles fuentes de demanda (fila 4). De acuerdo con ello, la fila 2 refleja los pedidos ya comprometidos con los clientes en los dos primeros meses del año, los cuales constituyen, por tanto, demanda en firme para dicho período; representan la materialización de la previsión, por lo cual, en el primer mes, serán tenidos en cuenta en lugar de la cifra prevista, especialmente considerando que ésta es inferior a aquéllos. Por lo que respecta al segundo mes, más alejado en el tiempo y con un valor inferior a la previsión, tomaremos a esta última para los cálculos. En la fila 3 aparecen los pedidos pendientes del ejercicio anterior que, en principio, deberán ser servidos lo más rápidamente posible, por lo cual han sido considerados como necesidades para el mes de enero. La fila 4 indica la cantidad necesaria para reponer el stock de seguridad, lo cual también debería hacerse en el primer mes del año. De acuerdo con estas consideraciones se obtienen las necesidades de producción mensuales (fila 5) y, a partir de éstas, las necesidades acumuladas, período a período, a lo largo del año. La última fila de la tabla indica el número de días productivos de cada mes.

Los **costes** calculados por la empresa son los siguientes:

- — Materiales por unidad de familia: 5.000 u.m.
- — Hora estándar de mano de obra en jornada regular: 1000 u.m.
- — Hora estándar extra de mano de obra: 1.500 u.m.
- — Hora ociosa de mano de obra: 1.100 u.m.
- — Contratación: 100.000 u.m./operario.
- — Despido de un trabajador eventual: 150.000 u.m.

Tabla 3.1. Plan de necesidades de producción y días productivos

	Ene.	Feb.	Mar.	Abr.	May.	Jun.	Jul.	Ag.	Sep.	Oct.	Nov.	Dic.	Acumulado
Previsión	9.000	(15.000)	10.000	5.000	5.000	5.000	10.000	5.000	5.000	10.000	15.000	20.000	114.000
Pedidos comprometidos	(10.000)	1.800											
Pedidos pendientes	+ (4.500)												
Reposición stock seguridad	+ (500)	=											
Plan necesidades producción	= (15.000)	(15.000)	10.000	5.000	5.000	5.000	10.000	5.000	5.000	10.000	15.000	20.000	120.000
Plan acumulado	15.000	30.000	40.000	45.000	50.000	55.000	65.000	70.000	75.000	85.000	100.000	120.000	120.000
Días productivos	20	20	22	20	22	21	20	22	22	20	21	20	250

- — Subcontratación de una unidad de la familia: 1.000 u.m., sobre el coste de producción regular en la empresa.
- — Posesión: 200 u.m./unidad y mes.
- — Servicio con retraso: 1.500 u.m./unidad y mes

Otros factores a considerar para el desarrollo de la planificación agregada, **derivados de las políticas de la empresa** son:

- — Existen tres turnos, siendo posible el trabajo simultáneo de 50 operarios. Ello implica un máximo de 1.200 h.e./día (150 operarios × 8 h.e./día y operario).
- — El máximo de horas extras diarias permitidas por convenio es el 10 por 100 de las disponibles en jornada regular.
- — No se contempla la posibilidad de despidos de operarios fijos.
- — Todos los costes se consideran funciones lineales.
- — La demanda diaria, dentro de cada mes, se considera uniforme y continua.

Antes de desarrollar el presente ejemplo conviene recordar que, al evaluar las diferentes alternativas, sólo consideraremos aquellos costes que varíen de una a otras. Así, por ejemplo, el coste derivado del mantenimiento del stock de seguridad no aparecerá en los cálculos, pues será el mismo para cualquiera de ellas. Debido a ello, el coste de posesión que consideraremos será el derivado de las unidades mantenidas por encima del citado nivel; por la misma razón, el inventario que aparecerá al final de cada mes (ver Tablas 3.2 a 3.4) será 500 unidades inferior al real. Este criterio no afecta a los resultados obtenidos y es utilizado por otros autores (por ejemplo: Aquilano y Chase, 1991, pág. 409 y siguientes). El coste mensual de posesión (C_{Pm}) será calculado como producto del coste unitario de posesión (C_{Pu}) por la semisuma de los stocks existentes al final (I_{Fm}) y al principio (I_{Im}) de cada mes (inventario medio):

$$C_{Pm} = C_{Pu} \cdot (I_{Fm} + I_{Im})/2$$

Esta simplificación no es excesiva, especialmente teniendo en cuenta que hemos supuesto que la demanda diaria es constante dentro de cada mes.

Dicho esto, vamos a representar gráficamente (Figura 3.4) las necesidades acumuladas de producción que calculamos en la Tabla 3.1. Si tenemos en cuenta las restricciones de capacidad existentes podremos calcular la **máxima producción diaria:** 1.200 h.e./día ⇒ 1.200 (h.e./día) / 1,5 (h.e./un.) = 800 un./día.

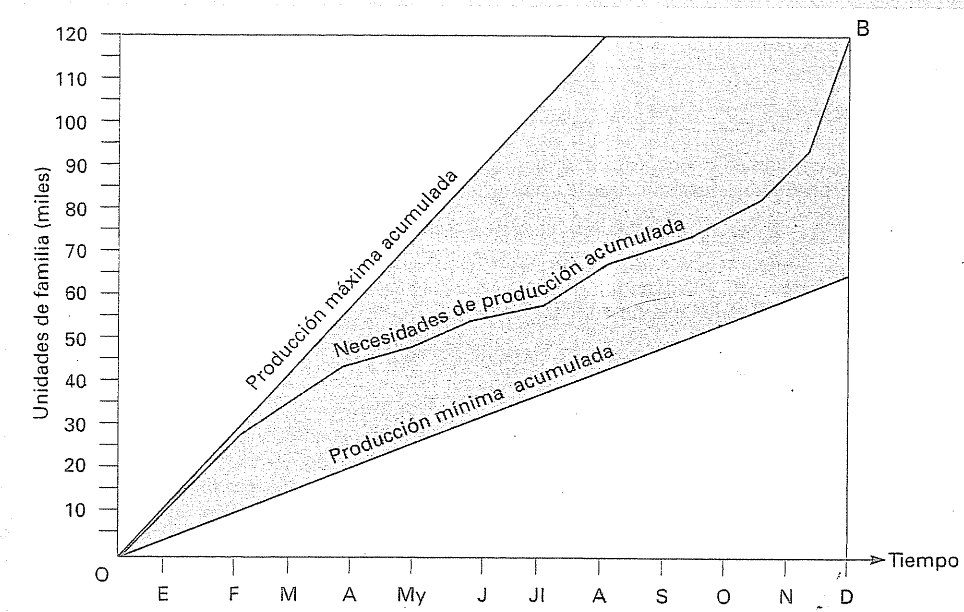


Figura 3.4. Gráfico de producción acumulada.

Ello nos permitirá dibujar la **línea de producción máxima acumulada** de la Figura 3.4. Lógicamente, cualquier alternativa de Plan de Producción que no incluya subcontratación externa deberá mantenerse siempre por debajo de la línea mencionada.

De otro lado, y dado que existen 50 trabajadores fijos, el valor **mínimo de la producción diaria**, si no se consideran tiempos ociosos, vendría dado por: 400 h.e./día ⇒ ⇒ 400 (h.e./día) / 1,5 (h.e./un.) = 267 un./día.

Dicho valor será la pendiente de la recta de **producción mínima acumulada** en las condiciones mencionadas. Cualquier Plan de Producción acumulado, que no implique subcontrataciones ni tiempos ociosos, deberá mantenerse entre las líneas máxima y mínima. Si, además, su gráfica termina en el punto B (120.000 unidades acumuladas en diciembre), satisfará justo al final del horizonte de planificación las necesidades acumuladas de nuestro ejemplo. Por último, diremos que, si no se desean retrasos en la entrega, el gráfico del plan correspondiente deberá situarse entre la línea que representa dichas necesidades (OB) y la línea de pendiente máxima. El empleo de gráficas como las comentadas representan sólo un elemento de ayuda para obtener una primera visión del problema, pero difícilmente podrían servir para realizar una valoración de costes. Para realizar cálculos pormenorizados habrá que pasar al empleo de tablas.

Dado que no disponemos de ningún Plan de Producción de partida, vamos a comenzar elaborando dos planes con estrategias puras para pasar, a continuación, a emplear una mixta.

ALTERNATIVA 1: **Alternativa de caza** (ver Apartado 3.3)

Se producirá mensualmente una cantidad igual a las necesidades de producto, ajustando la capacidad, básicamente, a través de variaciones en mano de obra aunque las políticas de la firma provocarán el empleo de tiempos ociosos (limitación al despido de operarios fijos) y de retrasos en la entrega (restricciones de capacidad). Los resultados, cuyo cálculo se comenta seguidamente, aparecen en la Tabla 3.2.

- La **producción regular de cada período** se iguala a las correspondientes necesidades, con un límite igual al número de días productivos del mes multiplicado por la producción máxima diaria (800 un./día). Debido a ello, en diciembre pondríamos 16.000 unidades (20 días × 800 un./día), en lugar de las 20.000 necesarias.
- Las **horas de mano de obra regular** se obtienen multiplicando la fila anteriormente mencionada por las 1,5 h.e. necesarias por unidad de familia.
- La **mano de obra regular** necesaria se obtendrá dividiendo la fila anterior por el número de horas regulares desarrolladas al mes por cada trabajador (días productivos × 8 h.e./día y trabajador). Hay cinco meses en los que aparecen dos cantidades en las correspondientes casillas; la de arriba indica el número de trabajadores realmente necesarios pero, dado que éste es menor que la plantilla fija de 50 operarios (considerada irreducible), es esta última la que se considerará en realidad, apareciendo en la parte inferior de las casillas. Ello generará, lógicamente, tiempos ociosos. De otro lado, en algunos meses se ha redondeado por exceso el número de trabajadores (por ejemplo: enero — 15.000 un. ⇒ 140,625 operarios ≈ 141); las horas ociosas que ello implica no se considerarán como tales al calcular los costes.
- El **coste de la mano de obra regular** coincide con el de las correspondientes horas, pues es igual a estas últimas multiplicadas por 1.000 u.m./h.e. y divididas por 1.000 (para expresarlas en miles de u.m.). Es interesante observar que en los períodos con tiempos ociosos, sólo se ha valorado en esta fila el tiempo productivo; el coste derivado de la ociosidad se calcula en la penúltima fila de la Tabla 3.2.
- La **variación de mano de obra** de un determinado período vendrá dada por la diferencia entre el número de trabajadores de dicho período y el anterior. Si el resultado es positivo, implicará contrataciones a realizar; en caso contrario se producirán despidos.
- El **coste de contrataciones y despidos** se calcula multiplicando los respectivos costes unitarios (100) (mil) u.m. y 150 (mil) u.m.) por las correspondientes contrataciones y despidos en valor absoluto.
- En la fila de **inventarios finales** no aparece ninguna cifra excepto en diciembre, con una cantidad de −4.000 procedente de la demanda no satisfecha. En el resto de los meses se piensa producir exactamente lo necesario, por lo que sólo tendríamos el stock de seguridad (500 u.m.) el cual, por las razones apuntadas en 3.4 no figurará en nuestros cálculos.
- El **coste de posesión y de retrasos en la entrega**. El primero no se da y el segundo se calculará multiplicando los valores absolutos de la fila anterior por los respectivos costes unitarios (1.500 u.m./un. y mes).
- El **coste de ociosidad** se halla multiplicando el número de horas ociosas por el correspondiente coste. Las primeras se hallan calculando la horas derivadas del empleo completo de la plantilla fija (50 trabajadores × n.º de días productivos × 8 h.e./día) y restándole las horas de mano de obra regular realmente requeridas en el período en cuestión.

El **coste incremental** sobre el coste básico (ver Apartado 3.3) se halla sumando los costes que aparecen en la Tabla 3.2, que totalizan una cifra de **221.830.000 u.m.** Por lo que respecta a la **satisfacción del cliente**, se sirven a tiempo 116.000 unidades de las 120.000 requeridas, lo cual implica un nivel de servicio (ver Capítulo 13) de 116.000/120.000 = **96,67 por 100.**

Tabla 3.2. Plan Agregado según Alternativa 1 (Coste en miles)

	Ene.	Feb.	Mar.	Abr.	May.	Jun.	Jul.	Ag.	Sep.	Oct.	Nov.	Dic.	Totales
Plan necesidades producción	15.000	15.000	10.000	5.000	5.000	5.000	10.000	5.000	5.000	10.000	15.000	20.000	120.000
Días productivos	20	20	22	20	22	21	20	22	22	20	21	20	250
Producción regular	15.000	15.000	10.000	5.000	5.000	5.000	10.000	5.000	5.000	10.000	15.000	16.000	116.000
Producción horas extras	× 1,5 he											⊕	⊖
Horas M.O. regular	22.500	22.500	15.000	7.500	7.500	7.500	15.000	7.500	7.500	15.000	22.500	24.000	
Mano de obra (M.O.)	:20 × 8 141 × 1 mil	141 −	86 ÷	47/50	43/50	45/50	94	43/50	43/50	94	:21 × 8 134	150	
Coste M.O. regular	22.500	22.500	15.000	7.500	7.500	7.500	15.000	7.500	7.500	15.000	22.500	24.000	174.000
Variación mano de obra	−9		−55	−36			44	−44		44	40	16	
Coste contrataciones y despidos	1.350	|−9| · 150 mil	8.250	5.400			× 100 4.400	6.600		4.400	4.000	1.600	36.000
Horas extras (H.E.)													
Coste H.E.													
Coste subcontratación													
Inventario final												−4.000	
Coste posesión y retraso											|−4.000| × 1,5	6.000	6.000
Coste M.O. ociosa				550	1.430	990		1.430	1.430				5.830
Coste total													221.830

La Figura 3.5. muestra las necesidades de producción y la evolución de la mano de obra a que ha dado lugar la presente alternativa, pudiendo observarse el paralelismo existente entre ambas.

Un factor a tener en cuenta al aplicar esta estrategia (ver Apartado 3.1.) es que los despidos frecuentes pueden crear inseguridad, disminución en la motivación, en la satisfacción en el trabajo, etc, y, consecuentemente, en la productividad, pudiendo afectar, por tanto, las previsiones realizadas al elaborar el plan.

ALTERNATIVA 2: **Nivelación de la mano de obra**

De acuerdo con ella, la plantilla, y, por tanto, la producción regular, permanecerá constante. Realizaremos los ajustes necesarios a través de la variación de inventa-

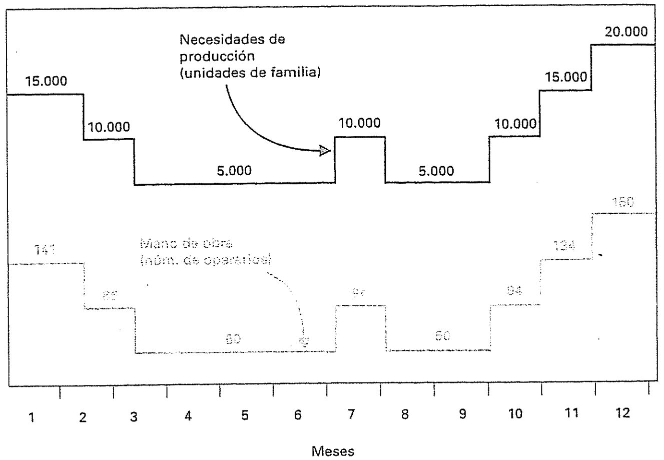


Figura 3.5. Alternativa de caza.

rios. Las necesidades anuales (120.000 un.) llevan a una producción diaria igual a 480 unidades (120.000 un./250 días) y, por tanto, a 720 h.e. (480 un. × 1,5 h.e./un.). Así pues, hará falta mantener 90 trabajadores (720 (h.e./día)/8 (h.e./día y trabajador)).

A partir de este dato, y procediendo de forma análoga a la de la alternativa 1, se desarrollan los cálculos contenidos en la Tabla 3.3. La fila de producción regular se calcula multiplicando la producción diaria (480 un.) por el número de días productivos. Conviene comentar algunos aspectos sobre el cálculo que no fueron necesarios en la alternativa anterior. Así:

- Inventario final (i) = Inventario final (i—1) + producción (i) — necesidades (i). Si el resultado es negativo, indicará necesidades no cubiertas y servidas con retraso.
- El coste de posesión se calculará multiplicando el coste de posesión unitario (200 u.m.) por el inventario medio, siendo éste, para un período dado, igual al inventario final más el inicial dividido por dos.
- Cuando se trate de stocks negativos, estos indicarán unidades servidas con retraso. Su coste se calculará multiplicando su valor absoluto por el coste unitario correspondiente (1.500 u.m.).

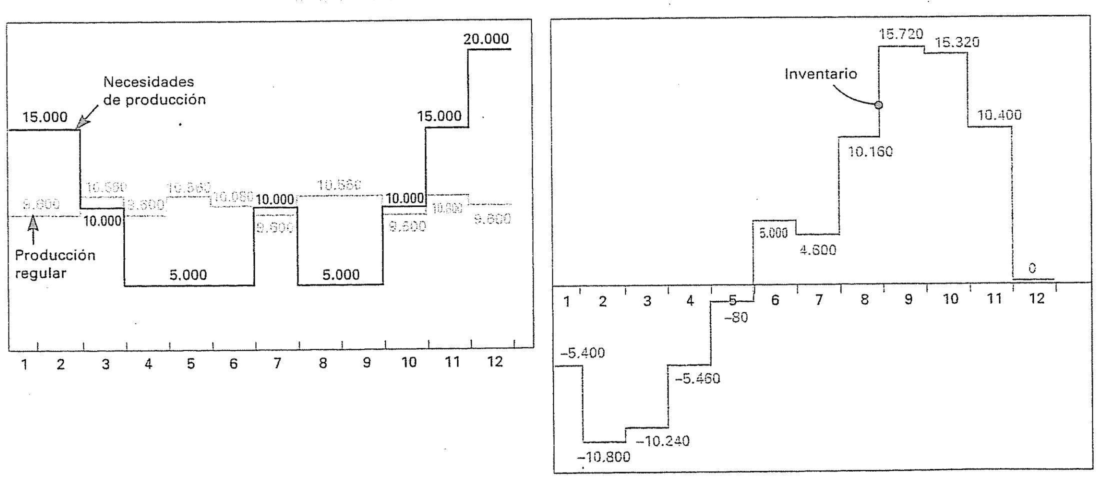


Figura 3.6. Alternativa de nivelación de la mano de obra.

Tabla 3.3. Plan Agregado según Alternativa 2

	Ene.	Feb.	Mar.	Abr.	May.	Jun.	Jul.	Ag.	Sep.	Oct.	Nov.	Dic.	Totales
Plan de necesidades de producción	15.000	15.000	10.000	5.000	5.000	5.000	10.000	5.000	5.000	10.000	15.000	20.000	120.000
Días productivos	20	20	22	20	22	21	20	22	22	20	21	20	250
Producción regular	(× 480) 9.600	9.600	10.560	9.600	10.560	10.080	9.600	10.560	10.560	9.600	10.080	9.600	120.000
Producción H.E.													
Subcontratación (un.)													
Horas M.O. regular	14.400	14.400	15.840	14.400	15.840	15.120	14.400	15.840	15.840	14.400	15.120	14.400	
Mano de obra	90	90	90	90	90	90	90	90	90	90	90	90	
Coste M.O. regular (miles)	14.400	14.400	15.840	14.400	15.840	15.120	14.400	15.840	15.840	14.400	15.120	14.400	180.000
Contrataciones y despidos	−60												
Coste contratación y despido (miles)	9.000												9.000
Horas extras (H.E.)													
Coste H.E. (miles)													
Coste subcontratación													
Inventario final	−5.400	−10.800	−10.240	−5.640	−80	5.000	4.600	10.160	15.720	15.320	10.400	0	
Coste posesión y retraso (miles)	8.100	16.200	15.360	8.460	120	492	960	1.476	2.588	3.104	2.572	1.040	60.472
Coste total (miles)													249.472

Como era previsible, han aumentado mucho los costes de posesión y retraso, mientras que se han anulado los de contrataciones y despidos. Desde la Tabla 3.3, calculamos un **coste incremental de 249.472.000 u.m.**, muy superior al de la alternativa precedente. A esto se une una peor **satisfacción del cliente**, pues sólo se han servido a tiempo 87.840 unidades. lo cual implica un nivel de servicio del **73,2 por 100** (87.840/120.000). Así pues, *la alternativa 1 es la más conveniente, por lo que la tomaremos como punto de partida para iniciar un proceso de pruebas con objeto de mejorarla.* La Figura 3.6 muestra la evolución de las necesidades de producción, de la producción regular y de los inventarios, viéndose cómo el comportamiento de estos últimos es función de la diferencia entre las dos primeras; por ello, dada la constancia en la producción regular, oscilan en sentido contrario a las necesidades de producción.

Antes de iniciar el proceso de mejora de la Alternativa 1 conviene hacer un breve análisis acerca de algunas de las opciones posibles que se pueden plantear cuando,

en un determinado período, no se puede hacer frente a las necesidades mediante la producción regular. Estas son:

∘ **Servir con retraso**, lo cual implicaría un coste incremental de 1.500 u.m. por unidad y período retrasado. Además, el incremento de producción del período siguiente puede ser incompatible con la capacidad en el mismo, lo cual llevaría a retrasar otras unidades e incrementar de nuevo el coste. Por otra parte, hay que añadir que esta opción hace disminuir el nivel de servicio al cliente.

∘ **Subcontratar**, lo cual traería consigo un coste incremental de 1.000 u.m. por unidad.

∘ **Producir en horas extras**, que provoca un coste incremental de 750 u.m./un. (1.500 u.m./h.e. extra − 1.000 u.m./h.e. regular) × 1,5 h.e./unidad).

De lo anterior se deduce que, en caso de falta de capacidad, habría que acudir en primer lugar a las horas extras, en segundo a la subcontratación y, como último recurso, a servir con retraso. Por otra parte, un uso más racional de las contrataciones y despidos podría disminuir los costes que de ellos se derivan y hacer, además, menos necesarias las tres opciones anteriormente mencionadas.

ALTERNATIVA 3

Vamos a probar, pues, una tercera alternativa, que mejore la primera, siguiendo las pautas anteriormente mencionadas (ver Tabla 3.4).

Comenzamos, igual que en la alternativa 1, despidiendo nueve operarios y quedándonos con los 141 necesarios para fabricar las 15.000 unidades requeridas en enero y febrero. En marzo nos quedaríamos con los 86 que hacen falta para las 10.000 unidades de dicho mes, manteniendo a continuación nivelada la mano de obra con 52 trabajadores entre abril y septiembre para hacer frente al conjunto de las necesidades de dicho intervalo (35.000 unidades):

— Necesidades de abril a septiembre: 5.000 + 5.000 + + 5.000 + 10.000 + 5.000 + 5.000 = 35.000 un.

— Horas estándares de abril a septiembre: 35.000 (un.) × 1,5 (h.e./un.) = 52.500 h.e.

— Número de días productivos (abril/septiembre): 20 + 22 + 21 + 20 + 22 + 22 = 127 días.

— Promedio diario horas estándares: 52.500 (h.e.) / 127 (días) = 413,5 h.e./día.

— Promedio diario mano de obra: 413,5 (h.e./día) / 8 (h.e./día y trabajador) ≈ 52 operarios.

En octubre se contrataría a 42 operarios para llegar a cubrir las 10.000 unidades de dicho mes:

— Horas estándares necesarias: Necesidades de producción (10.000 un.) × 1,5 (h.e./un.) = 15.000 h.e.

— Horas estándares disponibles: 52 (operarios) × 8 (h.e./día) × 20 (días) = 8.326 h.e.

— Desfase: 15.000 h.e. − 8.326 h.e. = 6.680 h.e. ⇒ ⇒ 6.680 (h.e.)/20 (días) × 8 (h.e./día y trabajo) ≈ 42 operarios.

Se podría terminar con una última contratación de 35 en noviembre para cubrir las correspondientes necesidades. Los déficit de producción se cubrirán con horas extras y, en caso de que ello no sea posible, con subcontratación.

Los cálculos de la Tabla 3.4 se han ido haciendo período a período; a título de ejemplo vamos a explicitar algunos de los cálculos de enero y julio:

Enero:

— Número de trabajadores: 141 (igual que en alternativa 1).

— Horas mano de obra regular: 141 trab. × 8 h.e./día × × 20 días = 22.560 h.e.

— Producción regular: 22.560 h.e./1,5 h.e. por unidad = 15.040 un. > 15.000 un. ⇒ No son necesarias horas extras ni subcontrataciones.

— Coste mano de obra regular: 22.560 h.e. × 1.000 un./h.e. = 22.560 miles de u.m.

— Coste de contrataciones y despidos: 9 (despidos) · 150.000 u.m. = 1.350 miles de u.m.

— Inventario final: Inventario inicial + Producción Total − Necesidades = 0 + 15.040 − 15.000 = 40 u.m.

— Coste posesión: $C_{Pu} \times (I_{Fm} + I_{Im})/2$ = 200 u.m. (40 + 0)/2 = 4 mil u.m.

Julio:

— Número de trabajadores: 52 (por la nivelación de la mano de obra)

— Horas mano de obra regular: 52 trab. × 8 h.e./día × × 20 días = 8.320 h.e.

— Producción regular: 8.320 h.e./1,5 h.e. por unidad = = 5.546 un.

∘ Necesidades no cubiertas: 10.000 (necesidades) − 5.546 (producción) − 2.641 (inventario disponible) = 1.813 un. ⇒ 1.813 un. × 1,5 h.e./un = 2.719,5 h.e. suplementarias.

∘ Horas extras disponibles = 10 por 100 sobre las horas de mano de obra regular = 832 H.E.

∘ Horas extras a realizar: (Mínimo entre 832 y 2.719,5) = 832 H.E.

∘ Producción en horas extras: 832 H.E./1,5 H.E. por unidad = 554 un.

— Coste mano de obra extra: 832 H.E. × 1.500 u.m./H.E. extra = 1.248 miles u.m.

Tabla 3.4. Plan Agregado según Alternativa 3

	Ene.	Feb.	Mar.	Abr.	May.	Jun.	Jul.	Ag.	Sep.	Oct.	Nov.	Dic.	Totales
Plan de Necesidades de producción	15.000	15.000	10.000	5.000	5.000	5.000	(10.000) ⊖	5.000	5.000	10.000	15.000	20.000	120.000
Días productivos	20	20	22	20	22	21	20	22	22	20	21	20	250
Producción regular	15.040	15.040	10.090	5.546	6.101	5.824	(5.546) ⊕	6.101	6.101	10.026	14.448	13.760	
Producción H.E.							(554) ⊕					1.376	
Subcontratación (un.)							(1.259) ⊕					3.188	
Horas M.O. regular	22.560	22.560	15.136	8.320	9.152	8.736	8.320	9.152	9.152	15.040	21.672	20.640	
Mano de obra	141	141	86	52	52	52	52	52	52	94	129	129	
Coste M.O. regular (: 10^3)	22.560	22.560	15.136	8.320	9.152	8.736	8.320	9.152	9.152	15.040	21.672	20.640	170.440
Contratación y despido	−9		−55	−34						42	35		
Coste contratatación y despido (miles)	1.350		8.250	5.100						4.200	3.500		22.400
Horas extras							832					2.064	
Coste H.E. (miles)							1.248					3.096	4.344
Coste subcontratación							3.147,5					7.970	11.117,5
Inventario final	40	80	170	716	1.817	(2.641) ⊖ →	(0)	1.101	2.202	2.228	1.676	0	
Coste posesión y retraso (miles)	4	12	25	88,6	253,3	445,8	264,1	110,1	330,3	443	390,4	167,6	2.534,2
Coste total (miles)													210.835,7

∘ Unidades a subcontratar: Necesidades no cubiertas (1.813 un.) − Producción con horas extras (554 un.) = 1.259 un.

— Coste de subcontratación: 1.259 un. subcontratadas × (1.500 u.m. + 1.000 u.m.) = 314.750 u.m.

El **coste incremental** total es **210.835.700 u.m.**, inferior al de la Alternativa 1, siendo además del **100 por 100 el nivel de servicio** al cliente. La Figura 3.7 muestra el resultado obtenido para esta alternativa.

Esta solución es, por supuesto, mejorable; así, puede probarse que contratando 73 trabajadores en octubre (en lugar de los 42 de la Alternativa 3) se producirían 3.306 unidades suplementarias (31 trabajadores suplementarios × 8 h.e./día × 20 días/1,5 h.e. por unidad), las cuales quedarían en inventario y evitarían la subcontratación de diciembre. En conjunto, la variación de coste produciría un ahorro de 6.942.000 u.m.

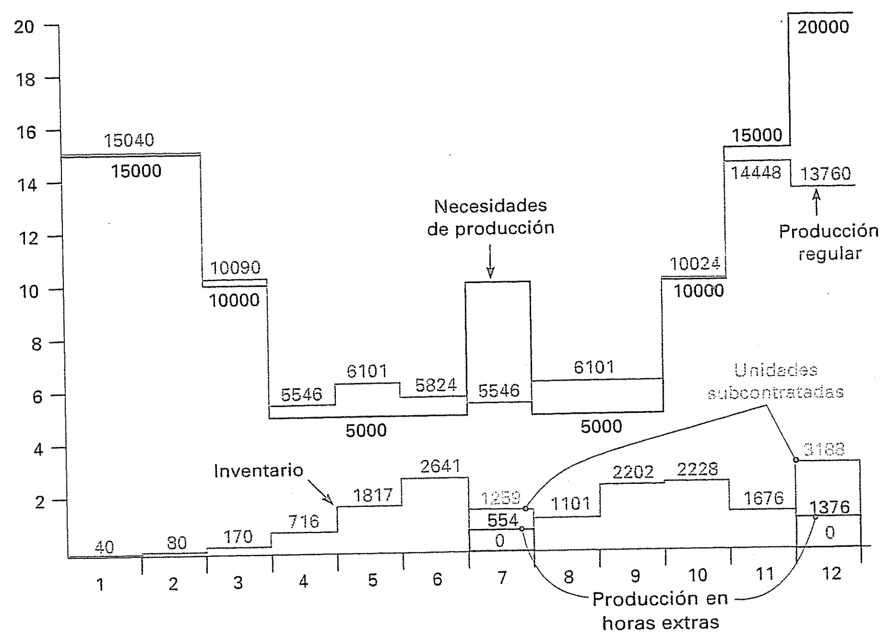


Figura 3.7. Alternativa mixta.

Aunque podríamos seguir mejorando la solución obtenida, consideramos que lo hasta aquí expuesto es suficiente para ilustrar este *procedimiento*, cuya *ventaja fundamental* es la de ser fácil de comprender y de utilizar, así como la de permitir ver claramente la relación entre los datos y el Plan Agregado obtenido. El método, sin embargo, no está exento de *inconvenientes;* como ejemplo, es evidente que la mecánica de cálculo es larga y tediosa. Además, dada la multiplicidad de opciones posibles de mejora, es prácticamente seguro que nunca se llegará a la «mejor» solución, aunque sin duda se caminará hacia ello. Sin embargo, este procedimiento puede simplificarse mucho mediante un adecuado **software** y una simple **hoja de cálculo** puede ser utilizada para desarrollarlo. Por otra parte, obtenido el Plan Agregado, la realización de un análisis de sensibilidad permitiría determinar las consecuencias derivadas de la aplicación de distintas alternativas, mejorando así la búsqueda de una solución satisfactoria. Ello se verá simplificado si ésta es precedida por la eliminación de alternativas mediante el uso de **reglas** que sirvan **de guía al decisor**. Aunque, a título de ejemplo, empleamos algunas al abordar la alternativa 3, existen estudios[10] que han desembocado en el estableci-

[10] Ver Kunreuther y Morton (1973) y McLain y Thomas (1977).

miento de un conjunto de reglas que van más allá de la simple consideración de los costes como elemento decisorio y tienen en cuenta otros aspectos importantes, tales como los mencionados en el Cuadro 3.1. En el Cuadro 3.2 aparecen las propuestas por McLain y otros, las cuales son aplicables cuando los costes puedan ser considerados lineales; lógicamente, el decisor es libre de emplear o no éstas u otras reglas durante el proceso de búsqueda de un Plan Agregado satisfactorio.

Antes de terminar deseamos añadir que la utilización de la hoja de cálculo permite ampliar con facilidad las posibilidades del método, tales como: emplear pedidos pendientes, considerar más de una familia de productos, permitir costes no lineales o considerar el efecto de las curvas de aprendizaje.

Cuadro 3.2 Reglas para la búsqueda de un plan agregado satisfactorio[11]

Parámetros

C_c: coste de contratación de un trabajador.
C_d: coste de despido de un trabajador.
C_i: coste incremental generado al producir una unidad agregada con horas extras.
C_p: coste de posesión por unidad agregada y mes.
n: número medio de jornadas productivas por mes.
p: productividad diaria (unidades agregadas/trabajador).
m: parte entera de $-0{,}5 + [0{,}25 + 2(C_c + C_d)/n \times p \times C_p]^{1/2}$ (meses).
l: parte entera de $(C_c + C_d)/(n \times p \times C_i)$.
k: parte entera de C_i/C_p.

Definición

Despido estacional: reducción en la mano de obra para la cual el próximo cambio programado es una contratación.

Reglas

1. Como mínimo debe transcurrir un período de $2 \cdot (m + 1)$ meses entre dos despidos estacionales. Si dicho período supera los 12 meses no deben utilizarse contrataciones y despidos.
2. El inventario debe alcanzar su nivel mínimo al menos una vez cada $2 \cdot (m + 1)$ períodos. Si algún plan viola esta regla, puede ser mejorado mediante un despido inmediato seguido de una contratación en un próximo futuro. Una excepción a esto último puede darse si la mano de obra se encuentra actualmente en su nivel mínimo.
3. Las reducciones de mano de obra sólo deben darse en el primer período o cuando el inventario esté en su nivel mínimo.
4. Después de despedir, no utilizar horas extras durante un período de (k + 1) meses, ni contrataciones en (m + 1) meses. Si es necesario, se planificará menor cantidad de despidos para evitar tener que violar la mencionada regla.
5. Para incrementos temporales de producción durante períodos $\leqslant$ 1 meses se utilizarán horas extras. Para períodos superiores la contratación eventual es más barata.
6. Después de contratar mano de obra, no planificar despidos durante (m + 1) meses ni horas extras en *k* meses. El incumplimiento de esta regla puede evitarse contratando antes (excepto si estamos en el primer período).
7. Dentro de las restricciones anteriores, producir lo más tarde posible para minimizar los costes de inventario.

[11] A partir de McLain y otros (1992). Hay que advertir al lector de que dichas reglas fueron deducidas en el contexto de EE. UU., lo cual no significa que sean válidas en nuestro país o en otro de características diferentes.

3.5.2. Técnicas de programación matemática

Son muchísimos los intentos de aplicar las técnicas de programación matemática para la obtención de un Plan Agregado óptimo[12] (ver Cuadro 3.3). Si el modelo planteado se hace a medida y se adapta suficientemente a la realidad, el resultado

Cuadro 3.3. Algunos modelos matemáticos de Planificación Agregada

Autores	Año	Tipo
Holt, Modigliani, Muth y Simon	1955	Programación cuadrática
Holt, Modigliani, Muth y Simon	1955	Reglas de decisión lineal
Bowman	1956	Programación lineal. Transporte.
Manne	1958	Programación lineal
Bowman	1963	*Management Coefficient Model*
Dzielinski-Gomory	1965	Lineal y simulación
Jones	1967	Paramétrica
Shwiner	1972	Programación lineal
Lasdon-Terjung	1974	Heurístico
Goodman	1974	Programación por objetivos
Gelders-Kleindorfer	1974	*Branch & Bound*
Goldvin	1975	Programación lineal
Bitran-Hax	1977	Programación lineal
Candea	1977	Programación lineal
Mellichamp y Love	1978	Heurístico (P.S.H.)
Axsäter	1979-1984	Varios modelos basados en programación matemática
Baker y Collins	1986	Programación lineal
Roundy y otros	1988	Programación por objetivos
Lin-Moodie	1989	Programación por objetivos

[12] Es necesario resaltar que será óptimo en relación con las hipótesis del planteamiento del modelo matemático. Cuanto más se acerquen éstas a la realidad más cerca estaremos del óptimo real que, en la práctica, será algo inalcanzable.

obtenido, con escasos ajustes, proporcionaría el Plan Agregado. Si, por el contrario, se emplea un modelo estándar de optimización, las hipótesis de partida no se adecuarán perfectamente al caso real; el resultado obtenido podría ser el punto de partida para elaborar planes alternativos que lo mejorasen y se acercasen más a las condiciones reales.

3.5.2.1. *Utilización de la programación lineal*[13]

El empleo de la programación lineal en planificación agregada se traduce, en general, en plantear una función objetivo que pretende minimizar los costes derivados de la mano de obra regular, horas extras, contrataciones y despidos, inventarios y retrasos. Esta función suele estar sujeta a restricciones de necesidades de producto o demanda agregada a satisfacer, disponibilidades de capacidad y evolución de inventarios y mano de obra. Para el caso en que la demanda pudiese considerarse constante en los distintos períodos, la resolución es más sencilla y análoga a la que aparece en el Anexo. Con objeto de ilustrar el método mencionado *utilizaremos el ejemplo empleado en el apartado anterior*, que representa una *demanda variable* a lo largo del año. Así (Ejemplo 3.3), podremos ver cómo las distintas hipótesis planteadas dan lugar a las restricciones y función objetivo que conducirían a la obtención del programa óptimo (ver nota 12). Por las razones apuntadas en el apartado anterior no consideraremos la posibilidad de servir con retraso; tampoco se admitirán tiempos ociosos. Ambos aspectos podrían ser tenidos en cuenta sin dificultad junto con otros, tales como capacidad de almacenamiento, límites a la subcontratación, a las contrataciones y despidos, etc.

EJEMPLO 3.3. Planificación agregada mediante programación lineal

A) Variables:

T_i: Trabajadores durante el período *i*.
C_i: Contrataciones al comienzo del período *i*.
D_i: Despidos al comienzo del período *i*.
P_{ri}: Producción en jornada regular en el período *i*.
P_{ei}: Producción en horas extras en el período *i*.
P_{si}: Producción subcontratada en el período *i*.

B) Parámetros (datos del problema):

Necesidades de producción del período *i*: NP_i.
Días productivos del período *i*: d_i.
Horas estándar por trabajador y día: 8.
Horas estándar por unidad de familia: 1,5.
Plantilla fija: 50.
Número máximo de trabajadores por período: 150.
Coste por h.e. en jornada regular: C_r = 1.000 u.m.
Coste por h.e. en tiempo extra: C_e = 1.500 u.m.
Coste por unidad subcontratada: C_s = 2.500 u.m.
Coste de contratación unitario: C_c = 100.000 u.m.
Coste de despido unitario: C_d = 150.000 u.m.
Coste unitario de posesión: C_p = 200 u.m.

C) Restricciones:

a) De mano de obra:

∘ Para cada período, i, debe cumplirse que el **número de trabajadores** ha de ser igual a los del período anterior (i − 1) más las contrataciones y menos los despidos del período i, es decir, $T_i = T_{i-1} + C_i - D_i$, o, lo que es lo mismo:

$$T_i - T_{i-1} - C_i + D_i = 0 \quad [1]$$

∘ El **número de trabajadores** en cualquier período será como mínimo igual a la plantilla fija (50) y como máximo igual al límite derivado de la capacidad de los equipos (150):

$$T_i \geq 50 \quad [2] \qquad T_i \leq 150 \quad [3]$$

b) De producción:

La **producción regular** de un período, i, será igual al número de horas que puedan desarrollar en jornada regular dividido por las horas estándar requeridas para

[13] Ver Anexo a esta parte.

la obtención de una unidad: $P_{ri} = T_i$ (trabajadores) · d_i (días) · 8 (h.e./día)/1,5 (h.e./un), es decir:

$$P_{ri} - 8 \cdot T_i \cdot d_i/1{,}5 = 0 \qquad [4]$$

El planteamiento de la restricción [4] no permite horas ociosas; si se desease admitir dicha posibilidad habría que cambiar el signo = por ⩽.

- La **producción en horas extras** de cada período, i, no debe superar el 10 por 100 de la producción regular durante el mismo, o sea, $P_{ei} \leqslant 0{,}1\, P_{ri}$:

$$P_{ei} - 0{,}1P_{ri} \leqslant 0 \qquad [5]$$

c) De inventario:

- El **inventario final** de un período, i, debe ser igual al inventario final del período anterior, i − 1, más la producción regular en i, P_{ri}, más la producción en horas extras, P_{ei}, más la producción subcontratada, P_{si}, menos las necesidades de producción del período NP_i, es decir: $I_i = I_{i-1} + P_{ri} + P_{ei} + P_{si} - NP_i$, o, lo que es igual:

$$I_{i-1} + P_{ri} + P_{ei} + P_{si} - I_i = NP_i \qquad [6]$$

- El **inventario final del último período** debe ser nulo:

$$I_{12} = 0 \qquad [7]$$

Dado que tenemos 6 variables y 6 restricciones por período ([1] a [6]), además de la [7], nos encontramos ante un caso de 72 variables y 73 restricciones, a las que hay que añadir las de no negatividad, que implican que todas las variables han de ser mayor o igual que cero.

D) Función objetivo, *Z*:

Se tratará de minimizar el coste total, compuesto por la suma de los costes por período de la mano de obra regular, producción (extra y subcontratada), contrataciones y despidos y posesión de inventarios. La función objetivo [8] muestra los costes en el orden mencionado (ver las Variables (A) y los Parámetros (B)):

$$Z_{min} = \sum_{1}^{12} \left[T_i \times d_i \times 8C_r + P_{ei} \times 1{,}5 \times C_e + \right.$$
$$\left. + P_{si} \times C_s + C_i \times C_c + D_i \times C_d + \frac{I_i + I_{i-1}}{2} \times C_p \right]$$

sustituyendo el valor de los parámetros de coste expresados en miles de u.m. (ver B) tendremos:

$$Z_{min} = \sum_{1}^{12} [8T_i \times d_i + 2{,}25P_{ei} + 2{,}5P_{si} + 100C_i +$$
$$+ 150D_i + 0{,}1I_i + 0{,}1I_{i-1}] \qquad [8]$$

En el caso hipotético de que el programa lineal planteado se adecuase bastante a la realidad, esta técnica tendría la ventaja de acercarnos al Plan Agregado óptimo. Sin embargo, en la mayor parte de los casos, lo que obtendremos será el óptimo del modelo planteado, pero no el óptimo real debido a diversas razones, entre las que podemos citar:

- Los modelos lineales no captan, o lo harán con dificultad, aquellas restricciones cuantitativas y cualitativas no expresables en forma lineal y, en muchas ocasiones, las posibles aproximaciones que puedan hacerse en este sentido no serán satisfactorias.
- Los costes no son en realidad lineales aunque, a nivel de planificación agregada, pueden hacerse aproximaciones satisfactorias cuando la curvatura de la función no es excesiva. En caso contrario, habría que recurrir a métodos que la aproximen a un conjunto de segmentos rectilíneos. Si ello no es posible, habría que emplear una formulación cuadrática o de otro tipo, lo cual complicaría notablemente el problema.
- La productividad de los trabajadores cambia a lo largo del tiempo[14], siendo este factor mucho más pronunciado cuando se realizan numerosas contrataciones y despidos; ello falsea el dato de número de horas necesarias por unidad producida que, en consecuencia, no será constante. Este factor ha sido tenido en cuenta en el planteamiento realizado por algunos autores (por ejemplo: Miller y Shapiro (1986) y Dada y Srikanth (1990).

[14] Recuérdense las curvas de aprendizaje (J. A. D. Machuca y otros, 1994, Capítulo 5).

Otros aspectos que pueden incrementar la dificultad de una aplicación realista son los siguientes:

- El número de familias de productos puede ser superior a uno.
- Puede ser importante tener que diferenciar distintos tipos de mano de obra.
- La utilización de esta técnica es compleja y requiere mucho tiempo; necesita personal con conocimientos suficientes, tanto en el problema de la planificación agregada como en la herramienta matemática, lo cual no es frecuente.
- Los programas estándar utilizados en el software de programación lineal no se adecúan a muchos casos reales, pues los condicionantes que dan lugar a las distintas restricciones varían de una empresa a otra. Incluso aquellos factores influyentes, derivados de otras áreas de la empresa, tales como Finanzas y Márketing, no suelen ser considerados.
- Hay que tener en cuenta que la técnica es válida para un horizonte temporal corto, durante el cual puedan considerarse constantes los valores de los parámetros empleados. El análisis de sensibilidad de la programación lineal (ver Anexo) puede ayudar a paliar, en cierta medida, este problema.
- El número de datos a manejar y la exactitud requerida en los mismos puede resultar excesivos. Un caso como el de nuestro ejemplo puede considerarse manejable con el empleo de un software apropiado, pero debemos considerar que representa una gran simplificación de la realidad; a medida que introduzcamos nuevas variables, parámetros y restricciones, la resolución del problema planteado podría volverse realmente compleja.

En comparación con las técnicas intuitivas del Apartado 3.5.1, más sencillas y rápidas y menos costosas, sería necesario sopesar las distintas ventajas e inconvenientes en cada caso. En cierto tipo de empresas, como por ejemplo las refinerías, en las que pequeñas desviaciones del plan óptimo generan costes muy elevados, suele emplearse la programación lineal. Sin embargo, en muchas empresas esto no ocurre y los incrementos de coste provocados por las mencionadas desviaciones no justifican el empleo de esta técnica para la planificación agregada, por lo que suelen utilizarse las comentadas en el Apartado 3.5.1.

El método del transporte (ver Anexo) proporciona un planteamiento para la planificación agregada basándose en una serie de hipótesis relativamente sencillas. Se trata de un modelo que pretende minimizar el coste total y que fue desarrollado[15] para disminuir la complejidad de los programas lineales existentes. La Tabla 3.5 ilustra un posible planteamiento de un caso como el que venimos utilizando pero en el que, por simplificar, hemos considerado únicamente tres períodos; como puede observarse en la mencionada tabla, la extensión a un mayor número de períodos no ofrece dificultad.

En la mencionada tabla aparece una nomenclatura de variables y parámetros análoga a la que hemos venido utilizando:

- C_r, C_e y C_s son, respectivamente, los costes por unidad producida en jornada regular, horas extras y subcontratación.
- C_p es el coste de posesión por unidad y período almacenado.
- NP_i son las necesidades de producción en el período *i*.
- P_{ri}, P_{ei} y P_{si} son las capacidades disponibles en jornada regular, extra y subcontratación en el período *i*.
- I_o e I_f representan el inventario inicial y el requerido al final del horizonte de planificación.

[15] La primera aplicación se debe a Bowman (1956).

Tabla 3.5. Matriz de costes de Planificación Agregada mediante el Modelo de Transporte

Períodos	1	2	3	Inventario final	Capacidad
Inventario inicial	0	C_p	$2C_p$	$3C_p$	I_0
Producción regular período 1	C_r	$C_r + C_p$	$C_r + 2C_p$	$C_r + 3C_p$	P_{r1}
Producción h. extras período 1	C_e	$C_e + C_p$	$C_e + 2C_p$	$C_e + 3C_p$	P_{e1}
Unidades subcontratadas período 1	C_s	$C_s + C_p$	$C_s + 2C_p$	$C_s + 3C_p$	P_{s1}
Producción regular período 2	X	C_r	$C_r + C_p$	$C_r + 2C_p$	P_{r2}
Producción h. extras período 2	X	C_e	$C_e + C_p$	$C_e + 2C_p$	P_{e2}
Unidades subcontratadas período 2	X	C_s	$C_s + C_p$	$C_s + 2C_p$	P_{s2}
Producción regular período 3	X	X	C_r	$C_r + C_p$	P_{r3}
Producción h. extras período 3	X	X	C_e	$C_e + C_p$	P_{e3}
Unidades subcontratadas período 3	X	X	C_s	$C_s + C_p$	P_{s3}
Necesidades de productos	NP_1	NP_2	NP_3	I_f	

Pensamos que los costes que aparecen en las diferentes casillas, pueden comprenderse fácilmente. Por ejemplo, el coste ($C_e + 2C_p$), correspondiente al período 3 y a la producción con horas extras en el período 1, indica que cada unidad estaría gravada por el coste de producción correspondiente (C_e) más el derivado de almacenarla los dos períodos que transcurren desde que se producen hasta que se consumen ($2C_p$). Se tratará, pues, de encontrar la producción de cada tipo a desarrollar en los distintos períodos, de forma que se minimice el coste total y se respeten las restricciones de capacidad, inventario final y necesidades de producto. El resto de los costes tiene una explicación análoga. Las casillas marcadas por X indican rutas imposibles (ver Apartado I.2. del Anexo), que, en nuestro caso, se traducen en que no se admite servir unidades con retraso. Si quisiésemos anular esta hipótesis, las casillas en cuestión serían factibles y se les asignarían los costes unitarios correspondientes a la producción de una unidad y a los derivados del retraso en la entrega. Así, si dicho coste fuese C_n u.m./unidad y período retrasado, el coste de servir una unidad del período 1 en el período 3 con producción subcontratada sería $C_s + 2C_n$.

Para aplicar este método es necesario que la suma de necesidades de producción e inventario final sea igual a la de las distintas capacidades de producción más el inventario inicial (ver Apartado I.2. del Anexo). Si esto no se cumple en la práctica, se añadiría una columna o una fila ficticia que, respectivamente, representarían la capacidad sobrante y las necesidades no satisfechas.

Aunque esta técnica no admite la posibilidad de introducir contrataciones y despidos, sus posibilidades van más allá de lo hasta aquí expuesto, pues pueden incluirse mayor número de circunstancias, como, por ejemplo:

- Productos perecederos que sólo pueden almacenarse un número limitado de períodos.
- Pérdida de ventas si el retraso en la entrega supera un cierto número de meses.
- Varias familias de productos compartiendo instalaciones comunes.
- Etc.

En cuanto a planteamiento y resolución, la aplicación es más sencilla que los programas lineales expuestos anteriormente, siendo ésta la única ventaja que posee respecto a estas últimas, las cuales pueden responder a un número más amplio de casos. En lo que concierne a los inconvenientes de los programas lineales, también son aplicables a la técnica que nos ocupa.

3.5.2.2. *La Programación cuadrática aplicada a la Planificación Agregada*

Esta técnica aventaja en grado de detalle y realismo a las anteriormente expuestas, pero también las supera en complejidad y en todos aquellos inconvenientes derivados de la misma. La aplicación más representativa es el denominado Modelo HMMS (Holt y otros, 1960), diseñado para resolver el problema de una fábrica de pinturas que experimentaba fluctuaciones en la demanda, mantenía gran volumen de inventarios y sufría frecuentes rupturas. Como consecuencia de ello, se perdían ventas o se incurría en elevado coste de contrataciones y despidos. La moral de los trabajadores era baja y la eficiencia pobre.

El resultado fue el planteamiento de un modelo matemático en el que se trataba de minimizar una función cuyos sumandos, unos lineales y otros cuadráticos, eran los costes que hemos manejado en las tablas del Apartado 3.5.1., excepto los de subcontratación. Dicha función se obtuvo mediante ajuste de datos de costes pasados. Las restricciones a cumplir, tantas como períodos del horizonte de planificación, obligan a que el inventario inicial, más la producción, menos la demanda igualen al inventario final.

La importancia del modelo HMMS, desde el punto de vista científico, es clara (fue el primer modelo no lineal de planificación agregada) y su aplicación fue exitosa (la empresa de pinturas disminuyó sus costes y mejoró sus inventarios y sus ventas, así como la moral de sus operarios). A pesar de ello, la posterior utilización de la programación cuadrática en la práctica no ha sido relevante. Las razones más probables derivan de los mismos inconvenientes que se comentaron para la programación lineal, con el agravante de que, en el presente caso, la complejidad del método es aún mayor, tanto para la obtención de la función de costes para cada caso concreto como para la resolución del modelo una vez elaborado.

Dadas las mencionadas dificultades de resolución del HMMS, sus autores obtuvieron dos reglas de decisión lineal a partir de un conjunto de funciones cuadráticas de coste, utilizándose una para el cálculo de la producción del próximo período y la otra para el volumen de mano de obra, de forma que se minimizase el coste total derivado de esta última, así como de las contrataciones y despidos, horas extras e inventarios. Dichas funciones, que suelen emplearse al comienzo de cada período, fueron denominadas **Reglas de Decisión Lineal** (Holt y otros, 1955). A pesar de que simplifican el problema cuadrático, la determinación de este tipo de funciones para cada caso concreto representa un esfuerzo considerable; además, la variación de los parámetros que la integran haría necesario calcularlas de nuevo. Por otra parte, como indica Stevenson

(1990, pág. 479 y ss.) «el método puede producir soluciones que no son factibles o son impracticables».

3.5.3. Las técnicas heurísticas

Este tipo de técnicas sirve para encontrar soluciones satisfactorias o aceptables del problema, pero pueden estar alejadas del hipotético óptimo. De entre las desarrolladas para planificación de la producción, las más conocidas son la de los **Coeficientes de Gestión** y la **Programación Paramétrica**, aunque no son las únicas.

El modelo de **Coeficientes de Gestión** (Bowman, 1963) toma una serie de datos de mano de obra, producción e inventarios de decisiones exitosas pasadas y, mediante técnicas de regresión, los reduce a aquellas ecuaciones que mejor se ajustan a los datos históricos. El planificador dispondrá así de una regla de decisión heurística que aplicará en el futuro; ésta es menos restrictiva y de más fácil obtención que las Reglas de Decisión Lineal. Por otra parte, no se pretende minimizar el coste, sino la desviación de la decisión respecto al comportamiento medio. Este enfoque no pretende explicar las razones por las cuales los directivos toman ciertas decisiones en determinadas circunstancias, sino únicamente describir el proceso individual de toma de decisiones. Aunque esta técnica funciona bien en ciertos contextos, no se emplea con mucha frecuencia. Una de sus principales debilidades procede de la dificultad de encontrar directivos que sepan analizar los datos pasados y ajustar un modelo de regresión que refleje correctamente el comportamiento en la toma de decisiones.

La aplicación de la **programación paramétrica** a la planificación agregada es propuesta por Jones en 1967. Se emplea una rutina de búsqueda de una norma de decisión de mano de obra y producción, pudiendo emplear funciones de coste cuadráticas que habría que minimizar.

Uno de los escasos modelos matemáticos implementados con un cierto éxito en la práctica es el conocido como **PSH** (*Production Switching Heuristics*)[16]. El PSH está ligado a un método de búsqueda con ordenador y limita las decisiones de producción agregada y mano de obra a un número de niveles predeterminado, los cuales se basan en la demanda prevista y en un conjunto de niveles deseados de inventario. Para Barman y Tersine (1993, pág. 511) este modelo tiene una serie de ventajas: en primer lugar, al seleccionar sólo un conjunto discreto de niveles de producción y mano de obra elimina la dificultad de reprogramar repetidamente dichas variables a lo largo del horizonte de planificación. En segundo lugar, es capaz de funcionar con cualquier tipo de estructura de costes asociados al subsistema productivo, cosa que no ocurre con los modelos lineales. Además, la parte básica del modelo, que contiene el procedimiento de búsqueda, es independiente de los sistemas productivos, pudiendo introducirse los aspectos específicos de los mismos con pequeñas alteraciones de aquélla. Por último, el modelo es muy flexible en cuanto a la admisión de restricciones productivas.

En conjunto, este tipo de métodos tiene como ventaja su fácil empleo, siempre que existan datos suficientemente abundantes y fiables y directivos con conocimientos para elaborar los modelos. También es importante tener en cuenta que el que una decisión tuviera éxito en el pasado no implica que la aplicación de reglas derivadas de la misma vaya a seguir dando buenos resultados en el futuro. En cualquier caso, la solución obtenida para un caso concreto podría y debería ser

[16] Ver Elmaleh y Eilon (1974) y Mellichamp y Love (1978).

mejorada o, al menos contrastada mediante la generación y evaluación de planes alternativos.

3.5.4. Las técnicas de simulación

Se trata de elaborar un modelo representativo del sistema estudiado, con el cual se simula el resultado que en éste se obtendría al tomar determinados valores las variables que lo integran; por medio de sucesivas pruebas se intenta llegar a una solución satisfactoria. El desarrollo de la informática ha facilitado el empleo de este tipo de técnicas y ha abierto un campo esperanzador, habiendo aparecido bastantes modelos en las últimas décadas.

El modelo más conocido es el denominado **Reglas de Búsqueda** (*Search Decision Rules*, Taubert, 1968, págs. 343 a 359). En él se toma como punto de partida un Plan Agregado caracterizado por unos ciertos valores de producción regular, horas extras, subcontratación, etc., que satisface las necesidades de producción, calculándose los costes totales correspondientes. A continuación, siguiendo reglas programadas de búsqueda, se selecciona otra combinación y se deducen sus costes; el proceso continúa secuencialmente hasta que no se consiguen mejoras significativas en los costes, tomándose como Plan Agregado la última combinación simulada.

Otro modelo bastante conocido (Vergin, 1966) es el denominado **Programación por Simulación** (*Scheduling by Simulation*), específico para casos de demanda estacional, utilizando un proceso análogo al mencionado anteriormente.

Es indudable que, aunque tampoco se consigue una solución óptima, el número de alternativas que se pueden probar es enorme, siendo, además, posible utilizar funciones de coste no lineales e incluso incorporar algunas restricciones. Ello, unido al desarrollo de los medios informáticos, hace que las técnicas de simulación sean una prometedora vía para el desarrollo de los planes agregados de producción.

3.6. EJEMPLOS DE APLICACION DE TECNICAS DE PLANIFICACION AGREGADA EN LAS EMPRESAS DE SERVICIOS

La mayor parte de los aspectos comentados a lo largo de este capítulo son aplicables tanto en el sector industrial como en el **sector servicios**, aunque pueden señalarse algunos aspectos diferenciadores que influyen en el tema de la planificación agregada, complicándola o facilitándola según los casos. Gran número de autores coinciden en señalar los siguientes factores:

- En muchas empresas de servicios, el cliente entra en el proceso de producción, es servido y sale. Piénsese, por ejemplo, en el caso de hospitales, bancos o restaurantes.
- En general, los servicios son intangibles y raramente almacenables, aunque hay posibilidades de actuación en cierto tipo de empresas para paliar dicha característica. Por ejemplo: las líneas telefónicas pueden ser llevadas a zonas de nueva urbanización antes de que se produzca la demanda de las mismas, existen calefactores que disponen de un sistema de acumulación de energía eléctrica que permite a los usuarios realizar el consumo durante la noche (en horas valle) y utilizarla durante el día (en horas punta) beneficiándose de tarifas más económicas, etc.

- Son muchos los servicios cuya demanda no puede posponerse y son requeridos por el cliente justo cuando los necesitan (por ejemplo: estaciones de servicios, restaurantes, etc.)
- En el sector servicios es más difícil encontrar medidas agregadas de capacidad dada la naturaleza individualizada y la variedad de muchos de ellos.
- En numerosas ocasiones el servicio no puede ser transportado, por lo que la capacidad para suministrarlo debe estar disponible no sólo en el momento, sino en el lugar adecuado.
- La subcontratación es más problemática en las empresas de servicios dado el peligro de captación de clientes por parte de la empresa subcontratista. A pesar de ello, es una opción utilizada en la práctica, como muestran los acuerdos entre compañías aéreas que dan vuelos en otra compañía cuando la propia empresa no dispone del horario o/y del trayecto deseado por el cliente.
- La utilización de maquinaria y equipo fijo para la prestación de servicios suele ser menos importante que el empleo de mano de obra. La flexibilidad de este recurso en comparación con el primero es un factor que facilita el establecimiento del Plan Agregado.
- La demanda es, con frecuencia, más difícil de prever, soliendo estar sujeta a más frecuentes e importantes variaciones.

Aunque nos hemos venido refiriendo a casos de empresas de fabricación, la metodología que hemos visto para la planificación agregada puede ser utilizada por las empresas de servicios aunque, lógicamente, habría que tener en cuenta las posibles peculiaridades de cada caso. Por ejemplo, en empresas del sector bancario o de transporte por carretera, la resolución del problema entraña menos dificultad que en las líneas aéreas, donde el número de factores a considerar hace de la planificación agregada un problema mucho más complejo.

Ejemplos de aplicación aparecen en diversas obras, aunque debido a razones de espacio y a que los casos suelen ser más simples que los expuestos en el presente capítulo, no incluiremos ninguno específico. Como ejemplo, en Adam y Ebert (1992, pág. 376) puede verse el caso de la Atlantic Southeast Airlines. Otro ejemplo de los mismos autores (pág. 392 y ss.) se refiere a un Departamento Gubernamental responsable de las calles y carreteras de un cierto área en lo que concierne a reparación viaria, construcción de nuevas vías y eliminación de hielo y nieve. Se debe establecer la combinación adecuada de obreros especializados y no especializados, equipos, subcontratación, etc., que conformen el Plan Agregado que haga frente a las necesidades previstas. En la elección de aquél se considera que, aparte de los aspectos de coste, es fundamental el criterio de eficacia en el servicio.

Otra aplicación a los servicios empleando el procedimiento de prueba y error es el caso del Departamento de parques y recreo de la ciudad de Tucson (Chase y Aquilano, 1991, pág. 414). Se utilizan como posibles alternativas empleados a tiempo completo, a tiempo parcial y subcontratación para hacer frente a las necesidades impuestas por el servicio, el cual se mide en unidades «equivalentes a obrero en tiempo completo».

3.7. ALGUNAS CONSIDERACIONES SOBRE LA UTILIZACION DE LAS DIFERENTES TECNICAS DE PLANIFICACION AGREGADA

En cuanto a la utilización de las distintas técnicas expuestas a lo largo del Apartado 3.5 hay, en realidad, pocos estudios, no existiendo resultados totalmente concluyentes; dicho esto, realizaremos algunas consideraciones al respecto.

Puede decirse que existe un convencimiento generalizado acerca de que el método más utilizado es el que hemos denominado «de prueba y error», empleando básicamente gráficos y tablas. Ello no quiere decir que sea este método el que proporciona la mejor solución, sino que es el de más fácil comprensión y aplicación por parte de la mayoría de los directivos. Por lo que se refiere a la programación matemática, de la que la programación lineal es la más empleada, ya comentamos en el Apartado 3.5.2. que no ha tenido gran difusión práctica, así como algunas de las principales causas que explican este hecho. Otro de los motivos del mismo puede proceder de la falta de confianza de los directivos en modelos complejos que no comprenden del todo, especialmente si deben basar en ellos decisiones importantes. El efecto contrario puede justificar, como dijimos, el éxito de los gráficos y tablas, en los que la bondad del resultado depende básicamente de la capacidad del planificador. No obstante, ya comentamos que, en cierto tipo de empresas, los beneficios que puede provocar la utilización de la programación matemática compensaría sobradamente el esfuerzo que conllevaría su implementación; en otras firmas, por el contrario, ello no estaría justificado.

Los posibles errores en las previsiones son un factor importante en relación con la planificación agregada. Dado que la aplicación práctica de los modelos matemáticos se vería tanto más facilitada cuanto más insensible fueran a los errores mencionados, sería importante conocer la robustez de los distintos modelos ante dichas circunstancias. En un estudio sobre el tema, Barman y Tersine (1991) concluyen que el modelo heurístico PSH es más efectivo que la programación lineal y que las reglas de decisión lineal en cuanto a la penalización provocada en los costes por errores de estimación en la función de costes. Los mismos autores (1990) muestran que dicho modelo funciona tan bien como las reglas de decisión lineal en varias condiciones reales que incluyen errores de previsión. En un reciente estudio (1993) complementan lo anterior comparando los resultados del PSH con los de la programación lineal, considerando errores en la previsión de demanda y una función lineal de costes. En términos generales, para errores de hasta un 40 por 100 (mayores de los que suelen darse en la práctica), ambos modelos producían resultados similares, aunque por un escaso margen a favor de la programación lineal. Sin embargo, éste no justifica la utilización de esta última dada su mayor complejidad y dificultad de aplicación. En conjunto, los resultados que hemos comentado muestran cómo el PSH aparece como una vía esperanzadora de aplicación práctica de los modelos matemáticos.

Por su parte, Lee y Khumawala (1974) compararon los resultados de una compañía de fabricación por lotes empleando una gestión intuitiva con los que podría haber obtenido al utilizar otras técnicas diferentes, tales como los Coeficientes de Gestión, las Reglas de Decisión Lineal, la Programación Paramétrica y las Reglas de Búsqueda Computarizada. Dichos autores comprobaron que la primera era la que menos mejoras conseguía (sólo un 4 por 100) y la última la que mayor incremento provocaba en el beneficio (un 14 por 100). Estos resultados no deben tomarse como generalizables, pero ilustran un caso concreto. Para terminar, podríamos decir, con Peterson y Silver (1979), que «aquellas empresas en las que la modelización es una forma de vida, son aquellas que intentan los métodos más sofisticados; en aquellas otras donde ello no es así, uno podría sospechar que se usan los gráficos y tablas. Entre ambos extremos se sitúan las compañías que tienen experiencia en el procesamiento de datos con ordenador y utilizan este instrumento para la planificación».

3.8. LA PROGRAMACION MAESTRA DE LA PRODUCCION

Elaborado el Plan Agregado, la siguiente fase en el proceso de Planificación y Control de Operaciones lleva a la determinación del Programa Maestro de Producción (PMP), el cual podría definirse como «*un Plan detallado que establece cuántos productos finales serán producidos y en qué períodos de tiempo*» (Krajewski-Ritzman, 1990, pág. 518). En este sentido, debe contener las **necesidades netas de fabricación** de cada ítem final, lo cual implica que, de las necesidades de productos, están descontados los ya fabricados (disponibilidades en inventario de items finales) y los que están en curso de fabricación. En esta concepción coinciden numerosos autores[17]. Sin embargo, otros autores[18] consideran al PMP como el *plan de necesidades de items finales, expresado en cantidades y fechas concretas* (incluyendo las previsiones de ventas y las otras posibles fuentes generadoras de necesidades). Ello implica no considerar que una parte de las mismas pueda estar fabricada o en curso, por lo que se trata de **necesidades brutas**. En este caso, las disponibilidades en inventario y los pedidos en curso se descontarán cuando se determinen las necesidades netas de items finales en la planificación de materiales (ver Capítulo 4).

Desde nuestro punto de vista, la divergencia entre ambos conceptos de PMP es más teórica que práctica, pues en ambos casos van a tenerse en cuenta las disponibilidades y los pedidos en curso de fabricación, lo cual llevará al mismo resultado final[19]. Por nuestra parte, en este capítulo seguiremos la primera de las opciones. Así pues, el PMP desarrolla dos funciones básicas:

- *Concretar el Plan Agregado*, tanto en las cantidades (de productos finales que deberán ser concluidas) como en el tiempo (estableciendo los momentos de conclusión de los mismos en una base temporal más concreta).
- *Facilitar*, por su mayor desagregación, *la obtención de un Plan Aproximado de Capacidad*, el cual permitirá establecer la viabilidad del Programa Maestro y, con ello, la del Plan Agregado.

3.8.1. Proceso de obtención de un PMP factible

Para llegar a un PMP viable respecto a la capacidad será necesario efectuar un proceso de desagregación análogo al establecido en la Figura 3.8.

Dicho proceso puede tener dos orígenes según que la empresa haya desarrollado un Plan Agregado (1) o que, simplemente, disponga de las previsiones de venta a medio plazo (2). En primer lugar, y en ambos casos, las cantidades agregadas, normalmente en unidades de familias de productos, han de ser descompuestas en unidades de items finales, (3) y (4). Hecho esto, será necesario reperiodificarlas en períodos más cortos, pasando de los meses (o trimestres) del medio plazo a intervalos más pequeños, normalmente semanas (o días en los meses más cercanos). De esta forma, las cantidades podrán ser desagregadas en el tiempo, precisando más el momento en que hacen falta y reflejando más exactamente las actividades a desarrollar.

[17] Ver, por ejemplo, Wallace (1985, pág. 129), Browne y otros (1988, pág. 95), Bolander y otros (1981, pág. 14), Leimains (1988, pág. 609), Chung (1984, pág. 390), Maranka (1977, pág. 54).

[18] Ver, por ejemplo, Chu (1987, pág. 129), Pendleton (1980, pág. 37) y Boyer (1988, pág. 184).

[19] En nuestra opinión, la diferencia puede venir motivada porque los autores que dan la segunda definición se sitúan en entornos MRP originarios (ver Capítulo 4). En este caso, el PMP era uno de los *inputs* al sistema y los cálculos derivados de la consideración de disponibilidades y pedidos pendientes eran realizados por el software MRP, por lo que podía partirse del PMP de necesidades brutas.

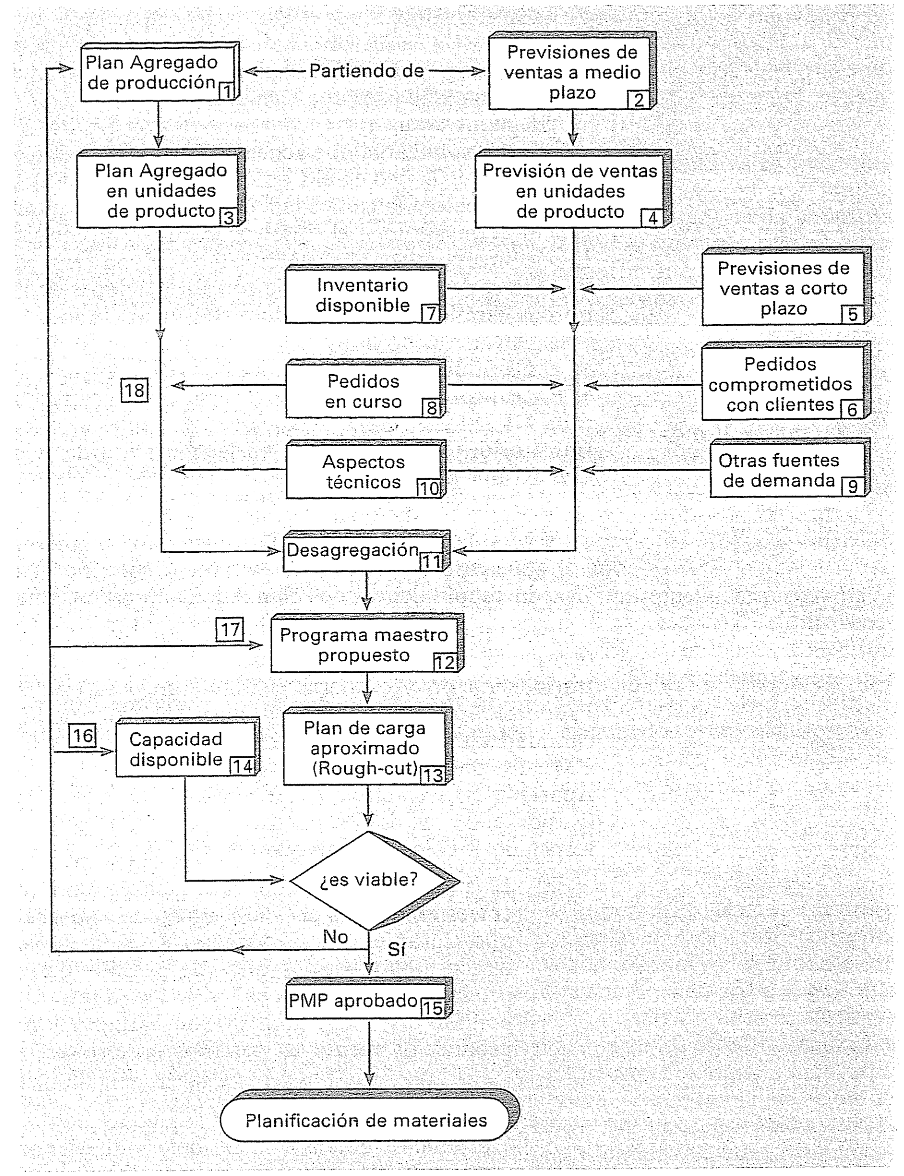


Figura 3.8. Proceso de Programación Maestra.

Si se parte de las previsiones de ventas a medio plazo, éstas deberán ser corregidas con las previsiones a corto plazo (5) y los pedidos de la cartera de clientes (6), así como con las disponibilidades de inventario (7), los pedidos en curso (8) y otras fuentes generadoras de demanda (9), al objeto de determinar las necesidades en unidades de productos. Estas últimas serán desagregadas por semanas (11) a partir de una adecuada información técnica sobre costes, tamaños

de lotes, etc. (10). Si, por el contrario, se partió de un Plan Agregado, los factores (5), (6), (7) y (9) ya fueron tenidos en cuenta (ver Apartados 3.1. y 3.5.1), por lo que para la desagregación semanal sólo se considerarán ahora los pedidos en curso y los mencionados aspectos técnicos.

Llegados aquí, nos encontraremos con un PMP propuesto (12), el cual será válido (15) si la carga que genera (13) es compatible con la Capacidad Disponible (14). Como se indicó en el Capítulo 1 (Apartado 1.3), aunque el Plan Agregado sea viable respecto a la capacidad, ello no garantiza que lo siga siendo el PMP por él generado (más aún si el PMP procede de la previsión de ventas a medio plazo). En este nuevo nivel nos encontramos ya con centros de trabajo y tipos de mano de obra concretos (en lugar de con agrupaciones de los mismos), con productos (y no con familias) y con semanas (en lugar de meses o trimestres). Es necesario, pues, llevar a cabo la planificación aproximada de la capacidad que describimos en el Capítulo 2; para ello habrá que comprobar si las cantidades que constan en el PMP propuesto pueden obtenerse con la capacidad disponible planificada de cada CT (en base a las condiciones normales de producción y medidas de ajuste transitorio que se aceptaron en la obtención del Plan Agregado). En el caso de que existan problemas de factibilidad pueden plantearse dos opciones:

- Medidas adicionales de aumento transitorio de capacidad (16).
- Modificaciones del PMP propuesto, cambiando de fechas las cantidades que en él constan, pero evitando que se produzcan retrasos en el servicio o incumplimientos del Plan Agregado o de las necesidades de productos (17).

Si estas medidas son suficientes, se procedería a ajustar el PMP y la Capacidad Disponible Planificada, obteniéndose un PMP aprobado (15). En caso contrario, sería preciso alterar el Plan Agregado (18) (si es necesario, incluso el de Producción a Largo Plazo) y volver a proponer un PMP conteniendo menores cantidades a producir, repitiéndose el proceso hasta llegar a uno viable (15). El PMP así obtenido es el punto de partida de la planificación de materiales (ver Apartado 1.3 y Capítulo 4). Además, facilitará el cumplimiento del Plan Agregado (y, por ende, el de Producción a Largo Plazo), siempre y cuando se hayan respetado los siguientes requisitos básicos en su obtención:

a) La suma de las cantidades contenidas en el PMP deben coincidir con las correspondientes del Plan Agregado. No obstante, debe tenerse en cuenta que, durante la desagregación, pueden emplearse procedimientos para el dimensionado de los lotes de pedidos que provoquen un exceso de la producción contenida en el PMP con respecto a la contenida en el mismo período del Plan Agregado (ver Ejemplo 3.4). Ello será corregido con una producción menor en períodos posteriores.

b) La desagregación debe ser eficiente, lo cual implica que:
- La descomposición de las familias debe hacerse a partir del *mix* de productos que la forman (determinado por la investigación comercial), teniendo en cuenta sus valores en el pasado y revisando éstos con las previsiones de demanda a corto plazo.
- El dimensionamiento y periodificación de los lotes del Programa Maestro debe hacerse con criterios de carácter económico, buscando aquella que haga mínimos los costes totales.

c) Deben evitarse las disponibilidades de inventario negativas a finales de los períodos, pues éstas indicarían retrasos en el servicio de parte de las necesidades generadas por la producción contenida en el Plan Agregado (procedentes de pedidos firmes de clientes, previsiones de demanda, pedidos pendientes, reposiciones de stock o cualquier otra fuente). Como excepción estarán aquellos períodos en que los inventarios negativos sean resultado de una política voluntaria de admisión de retraso en el servicio en determinados momentos (ver Apartado 2.6.7).

No siempre el PMP refleja las necesidades de productos finales tales como van a ser vendidos a los clientes. Son muchas las empresas que ofrecen una amplia variedad de opciones de cada producto. Piénsese, por ejemplo, en la industria automovilística y en las posibilidades de cada modelo: dos puertas/cuatro puertas, gasóleo/gasolina (4 cilindros/6 cilindros/motor V6, etc.), con aire acondicionado/sin aire acondicionado, distintos colores, distintos grados de acabado según los accesorios, etc. De esta forma, un número reducido de modelos base puede dar lugar a miles de variaciones en los productos finales. Si éstos son mantenidos como entrada al sistema MRP, el esfuerzo sería titánico (ver Capítulo 4): miles de productos en el PMP y en la previsión de ventas, almacenamiento y mantenimiento de miles de Listas de Materiales, explosión de necesidades de miles de productos, etc. Lógicamente, dada la enorme similitud de la mayor parte de dichos artículos, se opta por no hacer aparecer en el PMP los productos finales, sino los subconjuntos que sean, para cada modelo concreto, el denominador común más complejo de todas las variaciones del mismo. De esta forma se pasaría de los miles de productos mencionados a unas decenas de subconjuntos complejos o módulos.

El montaje de productos finales a partir de estos últimos puede ser programado en un tiempo mucho más corto que el necesario para el proceso total de aprovisionamiento, fabricación y submontajes. Para dar una idea del cambio de dimensión en cuanto a datos a manejar si se emplea el sistema modular, podemos decir que una determinada empresa elaboraba 138.000 productos finales a partir de sólo 40 módulos diferentes (Garwood, 1970). Los casos mencionados reflejan, respectivamente, entornos de *producción para stock con opciones* y de *montaje sobre pedido*, en los cuales el sistema MRP (ver también Capítulo 5) resulta especialmente adecuado.

3.8.2. El Horizonte de Planificación del PMP

En cuanto al **Horizonte de Planificación (HP)** cubierto por el Programa Maestro y a los **Cubos de Tiempo** en que éste se subdivide, dependerán del caso concreto, pudiendo oscilar el primero entre varios días o más de un año y el segundo entre una hora y un mes. Los estudios empíricos han producido resultados diversos que muestran que no hay un valor medio significativo[20], existiendo además distintas opiniones al respecto[21]. En general, puede afirmarse que en los estudios realizados en empresas usuarias de MRP (ver Capítulo 4), se aprecia un horizonte más largo dado que, al contar con un proceso informatizado, la posterior planificación de materiales (que comporta el mismo horizonte que el PMP) es más rápida. En las compañías que no disponen de este tipo de sistemas es indudable que la Planificación de Materiales se hace más penosa y, por ello, el horizonte se acorta notablemente. De otro lado, las características del proceso productivo y del entorno también condicionan la longitud del HP. Así, empresas que trabajan para inventa-

[20] Ver, por ejemplo, Anderson y otros (1981, págs. 19-20), Wemmerlöv (1977), Laforge-Sturr (1986), Berry y otros (1983).

[21] Ver, por ejemplo, Gaither (1992, pág. 362), Adam-Ebert (1992, pág. 389), Meredith (1992, página 392), Stevenson (1990, pág. 489) y Heizer-Render (1991, pág. 547).

rio en configuración continua (ver J. A. D. Machuca y otros, 1994, Capítulo 5), con ritmos de producción muy estables, podrán emplear horizontes superiores al año y cubos de tiempo mensuales. Por el contrario, si el número de productos y componentes es grande, la configuración es por lotes (*ibidem*) y la demanda es muy estacional e inestable, los cubos de tiempo se acortarán junto con el tamaño del HP.

Así pues, a este respecto, y a modo de conclusión, podemos decir que:

- *Con respecto al Horizonte de Planificación*, éste podrá ir de una semana a poco más de un año; no obstante, los más aconsejados son de un año para entornos MRP y de tres a seis meses para el resto. Como requisito generalmente aceptado[22], el HP siempre deberá ser, como mínimo, igual al mayor Tiempo de Suministro Acumulado de los productos finales que incluye el PMP (ver Apartados 1.4.2.3 y 2.A.1); sólo así, el sistema de Planificación de Materiales podrá incluir la sucesión completa de acontecimientos que llevan a la obtención del mismo (emisiones y recepciones de pedidos de materias primas y componentes fabricados (ver Capítulo 4)).
- *Con respecto a los Cubos de Tiempo*, el más empleado es de una semana[23]; períodos más cortos originan excesivos cálculos y salidas de datos para la planificación de materiales y períodos más largos implican la acumulación de desviaciones excesivas (considérese que, al menos los Planes de Materiales, deberían replanificarse cada cubo de tiempo para corregir desviaciones (ver Apartado 4.6.3)). El trabajar con períodos semanales implica que en la programación maestra no se está distinguiendo la secuencia de acontecimientos que se dan a lo largo de la misma[24], lo cual hace necesario referir las cantidades a un momento concreto del Cubo de Tiempo (normalmente al final de la semana) para poder coordinar las emisiones y llegadas de pedidos con las necesidades y disponibilidades.

Por último diremos que, cualquiera que sea su tamaño, el HP considerado no es estanco ni fijo, sino sujeto a una permanente actualización; el período de replanificación es una cuestión a definir en el Diseño del Sistema de Planificación y Control. Aunque hay autores que proponen actualizaciones semanales (Gaither, 1992, pág. 369), el PMP suele recalcularse cada mes para ajustarlo a las desviaciones, pasadas y previstas, con respecto a la situación de partida. Ello confiere una gran exactitud a las cifras contenidas en los primeros períodos del horizonte de planificación, sobre todo si se actúa con una cartera de pedidos. Para evitar los problemas derivados de los cambios producidos por las alteraciones del PMP sobre la producción en curso y sobre la planificada para los próximos períodos, las primeras semanas del HP deberían permanecer congeladas o invariables (ver Apartados 4.4.1 y 4.4.7). Para algunos autores (Scott, 1994, Apartado 16.5), éste intervalo debería ser, como mínimo, igual al TS de fabricación acumulado del último pedido planificado en firme. A medida que se vayan acortando los tiempos de suministro y simplificando los procesos productivos, la longitud a congelar del HP irá reduciéndose en consecuencia. Este es uno de los retos que deberían ser superados en la presente década.

---

[22] Ver, por ejemplo, Orlicky (1975, pág. 158), Malko (1977, pág. 78), Plossl y otros (1979, pág. 61) y Smith (1983, pág. 8).

[23] Ver, por ejemplo, Waters (1991, pág. 158) y Plossl (1991, pág. 69).

[24] Ello se tendrá en cuenta en la programación detallada (ver Capítulo 9).

3.9. LA DESAGREGACION DEL PLAN AGREGADO DE PRODUCCION: OBTENCION DEL PMP PROPUESTO

El proceso de desagregación pretende convertir las cantidades que constan en el Plan Agregado (en unidades de familia por mes) en cantidades de productos concretos por semana, de forma que, como antes expusimos:

- Se cubran las necesidades de fabricación contenidas en el Plan Agregado.
- Se eviten los retrasos en el servicio de las necesidades de productos.
- Se lleve a cabo todo ello con el menor coste posible.

Para desarrollar este proceso se han elaborado algunos modelos analíticos y de simulación[25], que consideran incluso los condicionantes de capacidad y realizan todo el proceso de una vez. Lo cierto es que adolecen de los mismos defectos comentados para los de planificación agregada, acentuados aquí, si cabe, por el mayor nivel de detalle de la programación maestra. Sin embargo, «es un problema que, sorprendentemente, ha recibido poca atención formal» (Adam-Ebert, 1992, pág. 389), sobre todo si se compara con otros aspectos de la planificación. Por ello, en la práctica, las empresas suelen apoyarse en procedimientos de prueba y error de diversos tipos[26] (similares a los descritos para la planificación agregada), basándose, pues, en la habilidad de los planificadores. Estos últimos pretenden lograr un PMP prospectivo aceptable a través de un proceso tipo que, aunque podrá variar en función de la empresa concreta, suele estructurarse en cinco fases:

- Descomposición de las familias del Plan Agregado.
- Periodificación de las unidades de producto en los Cubos de Tiempo.
- Dimensionamiento de los lotes de pedido y determinación de la fecha de obtención de los mismos: PMP inicial.
- Ajuste del PMP inicial en función de la demanda: PMP propuesto e inventarios finales por período.
- Determinación de las disponibilidades a comprometer con los clientes.

Para analizarlo vamos a emplear el ejemplo desarrollado en el Apartado 3.5.1, suponiendo que el Plan Agregado aceptado fue el obtenido para la alternativa 3 (Tabla 3.4), el cual reproducimos en la segunda fila de la Tabla 3.6. Vamos a suponer que el horizonte seleccionado para el PMP cubre los tres primeros meses del Plan Agregado, los cuales se periodifican en 12 semanas de cinco días productivos. Tomaremos, por tanto, 20 días de enero, 20 de febrero y 20 de marzo (aunque, como se observa en la Tabla 3.4, este último cuenta con 22 días productivos).

Se comienza por descomponer las cantidades del Plan Agregado (expresadas en unidades de familias) en cifras mensuales de productos concretos. La técnica más empleada es la que se conoce como **Previsión de Listas de Planificación** (*Forecasting Planning Bills*). Como indicamos anteriormente, estas listas no son más que una expresión de las proporciones previstas de los productos de cada familia en la demanda futura, las cuales se aplicarán a las producciones que constan en el Plan Agregado. En cuanto a estas últimas, se incluirán conjuntamente todas aquellas que vayan a ser desarrolladas por la empresa con sus propios recursos (por ejemplo: la producción regular o la que se realizará en horas extras). En nuestro caso, el Plan Agregado (Tabla 3.4) sólo contiene producción regular en los meses contemplados, por lo que será la única a considerar.

---

[25] Ver, por ejemplo, Winters (1962, pág. 470 y ss.), Hax-Meal (1975, pág. 58 y ss.), Bitran-Hax (1981, pág. 431 y ss.), Axsater-Johnson (1984, pág. 332 y ss.) y Lin-Moodie (1989, pág. 613 y ss.).

[26] Ver, por ejemplo, Vollmann y otros (1991, pág. 346 y ss.).

EJEMPLO 3.4. Obtención del Programa Maestro de Producción propuesto

Fases 1 y 2: Descomposición de las familias y periodificación semanal.

De acuerdo con lo expuesto anteriormente, la fila 2 de la Tabla 3.6 muestra las producciones agregadas que servirán de punto de partida para la obtención del PMP. Supuesto que la familia contiene únicamente dos productos (P1 y P2) y que los porcentajes de reparto estimados son, respectivamente, del 60 y 40 por 100, se obtendrían las cantidades de producción contenidas en

Tabla 3.6. Desagregación del Plan Agregado de Producción: PMP inicial

1	MESES	ENERO				FEBRERO				MARZO				
2	Plan Agregado (unidades familia 1)	15.040				15.040				10.090				
3	Plan Agregado (un. P_1/mes) 60 %	9.024				9.024				5.504				
4	SEMANAS	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	
5	Plan Agregado P1 (un./semana) (NB*i*)	2.256	2.256	2.256	2.256	2.256	2.256	2.256	2.256	1.376	1.376	1.376	1.376	
6	Inventario en exceso sobre Plan Agregado (IE*i*)	0	1.744	3.488	1.232	2.976	720	2.464	208	1.952	576	3.200	1.824	448
7	Pedidos en curso (PCi)	4.000									-			
8	Necesidades Netas de Producción (NN*i*)	−1.744	512	−1.232	1.024	−720	1.536	−208	2.048	−576	800	−1.824	−448	
9	PMP inicial de P1	0	4.000	0	4.000	0	4.000	0	4.000	0	4.000	0	0	
10	Plan Agregado (un. P2/mes) 40 %	6.016				6.016				3.668				
11	SEMANAS	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	
12	Plan Agregado P2 (un./semana) (NBi)	1.504	1.504	1.504	1.504	1.504	1.504	1.504	1.504	917	917	917	917	
13	Inven. en exceso sobre Plan Agregado (IE*i*)	0	1.996	492	488	984	2.980	1.476	3.472	1.968	1.051	134	2.717	1.800
14	Pedidos en Curso (PCi)	3.500												
15	Necesidades Netas de Producción (NN*i*)	−1.996	−492	1.012	−984	520	−1.476	28	−1.968	−1.051	−134	783	−1.800	
16	PMP inicial de P2	0	0	3.500	0	3.500	0	3.500	0	0	0	3.500	0	

las filas 3 y 10[27]. Seguidamente, es necesario periodificar dichas cantidades por semanas dentro de cada mes; en un principio, se considera un reparto uniforme, lo que lleva a dividir por 4 la producción mensual calculada en el paso anterior, obteniendo las cantidades que aparecen en las filas 5 y 12. Este criterio podría adaptarse en función del caso concreto (por ejemplo, hay productos cuya demanda puede ser mayor a comienzos o finales de mes, como ocurre con algunos artículos alimenticios).

Fase 3.: Dimensionado de lotes y obtención del PMP inicial.

Llegados aquí, deben calcularse los lotes de producción y determinar su fecha de terminación. Como indicamos al explicar el proceso de programación maestra (Figura 3.8), el Plan Agregado cubre todas las necesidades de productos finales, pues tiene en cuenta todas las fuentes generadoras de demanda. Como los inventarios iniciales se consideraron también al elaborar el Plan Agregado (en nuestro caso eran cero), la única información no tenida en cuenta es la de Pedidos en Curso (emitidos durante períodos anteriores a la semana 1 y que aún no se han concluido), los cuales no se incluyeron porque dicho plan no baja a ese nivel de detalle. Será necesario, pues, considerarlos ahora para evitar que en el PMP que se está calculando se vuelva a emitir y se produzca una duplicidad. Supondremos, en el caso de nuestro ejemplo, que hay un pedido en curso de 4.000 unidades de P1 y otro de 3.500 unidades de P2, cuya conclusión está prevista en la semana 1 (filas 7 y 14).

Con esta información se comienza a calcular, semana a semana, las cantidades del Programa Maestro de Producción. El primer paso es *determinar las necesidades netas semanales* (NN*i*, filas 8 y 15, Tabla 3.6) *a partir de las necesidades brutas* (NB*i*), representadas por la periodificación semanal del Plan Agregado (filas 5 y 12 en la Tabla 3.6). *Para ello hay que restar a estas últimas las disponibilidades en inventario* (IE*i*, filas 6 y 13) *y los pedidos en curso* que serán entregados la semana en cuestión (PC*i*, filas 7 y 14), es decir:

$$NNi = NBi - IEi - PCi$$

Si dicha cantidad es negativa, estará indicando que las disponibilidades previstas, superan a las necesidades, por lo que, por una parte, la diferencia entre ambas estará como inventario disponible al principio de la próxima semana y, por otra, que, lógicamente, no será necesario que llegue ningún pedido, por lo que, en la fila correspondiente al PMP inicial (9 y 16) aparecería un cero. Ese es el caso de la primera semana, donde para el producto 1 tenemos: $NN_1 = 2.256 - 0 - 4.000 = -1.744$.

Por el contrario, un valor positivo de NN*i* indica que las disponibilidades no son suficientes para cubrir a las necesidades; ése es el caso de la semana 2 para P1, en la que $NN_2 = 2.256 - 1.744 = 512$. De acuerdo con ello, deberá llegar un pedido que las cubra. Dado que las técnicas de dimensionado de lotes de pedido se estudian posteriormente (ver Capítulos 4, 6 y 13), aquí supondremos simplemente que se trabaja con lotes constantes, siendo su tamaño de 4.000 para P1 y de 3.500 para P2. Como el primero supera las necesidades netas de P1 en la semana 2, la diferencia entre ambos constituirá *inventario en exceso sobre el supuesto en el Plan Agregado*, el cual supondremos en principio utilizable para la semana 3 (ver filas 6 y 13 de la Tabla 3.6)[28]. De forma análoga se procede para el resto de las semanas y para el producto P2, dando lugar al **Programa Maestro Inicial** que aparece en la tabla 3.6. (filas 9 y 16), el cual no puede todavía considerarse como **propuesto**.

Ahora debemos tener en cuenta que el Plan de Necesidades de Producción y los Pedidos de Clientes en cartera fueron considerados en cifras mensuales globales y que las cantidades del Plan Agregado se expresaban en familias de productos, habiéndose descompuesto en base a unos porcentajes medios. Sin embargo, posiblemente, dichas cifras no se cumplirán si consideramos las previsiones de venta a corto plazo y las fechas y cantidades concretas de los pedidos comprometidos. Además, conocemos las disponibilidades en inventario en cifras agregadas para finales de enero y febrero, pero no para el final de cada semana y en unidades de cada producto. Por todo ello, es necesario realizar un «ajuste fino» del PMP inicial, para asegurarnos de que cubrirá las necesidades de productos en tiempo y cantidad (proceso que describiremos utilizando la Tabla 3.7).

En primer lugar incorporaremos la información pormenorizada de demanda haciendo que, para cada período, ésta sea igual al mayor valor de entre los pedidos comprometidos con clientes (fila 7) y la previsión de ventas a corto plazo (fila 6). Para los casos en que no

[27] Nótese que la producción de marzo es de 5.504 unidades de P1 y 3.668 de P2, cuando en realidad deberían ser de 6.054 y 4.036, respectivamente. Esta diferencia procede de que, al trabajar con semanas, sólo se han considerado 20 días de los 22 del mes de marzo, por lo que estas últimas cantidades han sido divididas por 22 y multiplicadas por 20.

[28] El inventario en exceso sobre el Plan Agregado del último período debe ser positivo o nulo y representa la cantidad producida en el PMP por encima de la previsión en el citado plan. Ello implicará un inventario final mayor que el determinado para esa fecha en el mismo, lo cual no debe suponer una quiebra de la eficiencia de la desagregación, pues dicha cantidad se detraerá en períodos posteriores.

Tabla 3.7. Determinación del PMP propuesto, inventario final y disponible a prometer

MESES (1)		ENERO				FEBRERO				MARZO			
Previsión M/P (un. familia 1/mes) (2)		11.000				14.000				10.000 (22 días)			
SEMANAS (3)		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
Previsión M/P para P1 (60 %) (4)		6.600				8.400				5.452 (20 días)			
Previsión M/P de P1 periodif. (5)		1.650	1.650	1.650	1.650	2.100	2.100	2.100	2.100	1.363	1.363	1.363	1.363
Previsión ventas a corto plazo (6)		1.000	1.700	1.300	1.400	2.000	2.000	2.500	2.500				
Pedidos comprom. con clientes (7)		1.000	2.000	1.500	1.500	1.000							
Pedidos pendientes de entregar (8)		2.500											
Pedidos en curso (9)		4.000											
PMP inicial (10)			4.000		4.000		4.000		4.000		4.000		
Inventario Final (Disp.+SS) (11)	0	500	2.500	1.000	3.500	1.500	3.500	1.000	2.500	1.137	3.774	2.411	1.048
Disponible a Prometer (12)		200	500	0	1.500	0	4.000	0	4.000	0	4.000	0	0
Previsión M/P para P2 (40 %) (13)		4.400				5.600				3.636 (20 días)			
Previsión M/P de P2 periodificada (14)		1.100	1.100	1.100	1.100	1.400	1.400	1.400	1.400	909	909	909	909
Previsión ventas a corto plazo (15)		500	900	1.100	1.100	1.500	1.500	1.400	1.600				
Pedidos comprom. con clientes (16)		500	1.000	1.250	1.250	800							
Pedidos pendientes de entregar (17)		2.000											
Pedidos en curso (18)		3.500											
PMP inicial (19)				3.500		3.500		3.500				3.500	
Inventario Final (Disp.+SS) (20)	0	1.000	0	2.250	1.000	3.000	1.500	3.600	2.000	1.091	182	2.773	1.864
Disponible a Prometer (21)		0	0	1.000	0	2.700	0	3.500	0	0	0	3.500	0
PMP alternativo de P2 (22)			3.500			3.500		3.500				3.500	
Inventario Final (Disp.+SS) (23)	0	1.000	3.500	2.250	1.000	3.000	1.500	3.600	2.000	1.091	182	2.773	1.864
Disponible a Prometer (24)		800	0	0	0	2.700	0	3.500	0	0	0	3.500	0

exista dicha información, se tomará la previsión de ventas a medio plazo (fila 2), una vez desagregada en función de los porcentajes de P1 y P2 (filas 4 y 13) y prorrateada entre las semanas del mes (filas 5 y 14). El procedimiento anterior queda justificado porque, por una parte, la previsión a medio plazo tiene un carácter más aproximado que la de corto en el horizonte cubierto por esta última (dos meses en nuestro caso)[29], especialmente en lo que se refiere a su periodificación (en el presente caso ésta se ha repartido uniformemente entre

[29] Para un análisis de los horizontes y técnicas de previsión a largo, medio y corto plazo, ver Delurgio-Bhame (1991).

las cuatro semanas[30], aunque podría utilizarse otro criterio si se conoce otra tendencia en la misma). En la Tabla 3.7 (filas 5-6 y 14-15) puede verse que no hay coincidencia entre ambas. Por otra parte, parece lógico que si los pedidos ya comprometidos con clientes en un cierto período superan a la correspondiente previsión de demanda a corto, se tomen los primeros como dato, pues implican una mayor certeza. En la Tabla 3.7 hemos sombreado los valores que serán tomados como demanda en cada período, tras la aplicación de estas reglas.

A dichos valores deberán añadirse las otras fuentes de demanda no consideradas en el Plan Agregado, en nuestro caso, las 4.500 unidades de pedidos pendientes que aparecían en la Tabla 3.1, las cuales se reparten de acuerdo con lo indicado en las filas 8 y 17 de la Tabla 3.7. Además, para hacer frente al conjunto de necesidades, deberán considerarse todas las fuentes de producción contenidas en el Plan Agregado: la desarrollada con recursos propios (PMP inicial (fila 10 y 19) y Pedidos en Curso), y las procedentes de recursos ajenos (como las subcontrataciones). De estas últimas no hay ninguna en el horizonte contemplado.

Si el Programa Maestro inicial cubre las necesidades mencionadas, el inventario semanal deberá ser igual o mayor que el stock de seguridad deseado. Dado que éste era igual a 500 para el conjunto de la familia (ver Tabla 3.1), los correspondientes valores para P1 y P2 serán de 300 (60 por 100 de 500) y 200 (40 por 100 de 500). Si esto se cumple, el PMP inicial se aceptará como propuesto; en caso contrario, habrá que retocarlo de forma que se cumpla la condición mencionada. Para ver que ha ocurrido en nuestro caso, se han calculado los inventarios período a período (compuestos, en principio, por el stock de seguridad (SS) y, en su caso, por el sobrante disponible (ver filas 11 y 20)), de acuerdo con la siguiente formulación (ver Tabla 3.7): el inventario final del período i es igual al del período $i - 1$, más la cantidad recibida en el período i (lote programado en el PMP inicial (filas 10 y 19), más los pedidos en curso a recibir (filas 9 y 18)[31], menos la cantidad demandada en el período i (remarcada en Tabla 3.7 a partir de la comparación de las filas 5, 6 y 7 y 14, 15 y 16), y menos los pedidos pendientes de entregar (filas 8 y 17)[32].

De la Tabla 3.7 se desprende que el inventario final de P1 cumple las condiciones mencionadas, por lo que el correspondiente PMP inicial será el propuesto; no ocurre lo mismo en el caso de P2, para el cual es cero en la semana 2, lo que implica que, de proponerse dicho PMP, no existiría stock de seguridad en el período mencionado, con el riesgo que esto conlleva. Una alternativa es corregir el PMP inicial de acuerdo con lo expresado en la fila 22; puede observarse (fila 23) que bastaría con adelantar la llegada del pedido en una semana, puesto que, a partir de la semana 3, el inventario siempre su-

[30] En el caso del mes de marzo, sólo se ha considerado la demanda de 20 días (4 semanas) del mes de marzo (=9.091 unidades de familia, que hemos redondeado en 9.088), siguiendo la misma línea que en la Tabla 3.6 con el Plan Agregado.

[31] De existir en el Plan Agregado alguna cantidad elaborada con recursos externos a la empresa (por ejemplo, subcontrataciones), debería incluirse una fila más para cada producto final, la cual se sumaría al resto de la producción.

[32] Es evidente que el inventario final tiene que corresponder al calculado para el Plan Agregado y así ocurre en este caso. Téngase en cuenta que ello no significa que la suma de los inventarios finales de P1 y P2 (1.048 + 1.864 = 2.912) tenga que ser igual al Inventario Final de marzo de la familia 1 (170 unidades en la Tabla 3.4.); veamos por qué:

De entrada, en el Plan Agregado se producen 40.170 unidades de la familia 1, mientras que el PMP y los pedidos pendientes dan lugar a 24.000 de P1 y 17.500 de P2 (41.500). Esto viene motivado por el dimensionamiento y periodificación de los lotes, que hace que se agrupen en el PMP cantidades que corresponderían a varias semanas del Plan Agregado. Por ello, al día 20 de marzo, se han producido en el PMP 1.330 unidades más que las que corresponderían al primero.

Además, las necesidades de producción del Plan Agregado son de 40.000 unidades; de ellas habría que descontar el Stock de Seguridad (500 unidades), que en el PMP quedan en inventario, quedando, pues, 39.500 unidades. Sin embargo, las necesidades satisfechas en el PMP son de 38.588 unidades (entre P1 y P2), es decir, 912 unidades menos que en el Plan Agregado. Esto viene motivado porque sólo hemos considerado 20 días de marzo en el PMP y no 22 como en aquél, siendo 912 unidades la demanda de esos dos días:

- Demanda para marzo en Plan Agregado 10.000
- Demanda para 20 días de marzo en PMP para P1 (1.363 × 4) 5.452
- Demanda para 20 días de marzo en PMP para P2 (909 × 4) 3.636
- Diferencia 912

Por todo ello, si restamos al Inventario final del PMP (1.048 + 1.864 = 2.912), el exceso de producción del mismo (1.330 unidades), y el exceso de demanda (912), obtendríamos 670 unidades, que son las 170 del Inventario final del Plan Agregado, más las 500 del Stock de Seguridad que no se incluyen en él.

pera las 200 unidades. Esta opción implicaría un aumento del volumen de inventarios durante un período, con el consiguiente incremento de costes; la Gerencia deberá valorar qué alternativa elige considerando los inconvenientes y ventajas de ambas posibilidades. Si aparecieran valores inferiores a 200 en algún período posterior, podría estudiarse un aumento en la producción, quizá emitiendo algún lote adicional de P2, lo que llevaría a tener que modificar el Plan Agregado. En relación con la semana 10, con un valor de 182 para el inventario final, no haremos nada por estar alejado en el tiempo y ser su valor cercano al del stock de seguridad.

En cuanto al **Disponible a Prometer** (filas 12, 21 y 24), representa las cantidades producidas que no están comprometidas con clientes; lógicamente, éstas nunca podrán ser inferiores a cero. Para determinarlas se procede de la siguiente forma:

- En el primer período se suma al inventario inicial de partida (cero) la cantidad producida (por pedidos en curso y PMP) y se le restan los pedidos comprometidos con clientes hasta la llegada de un nuevo lote y los pendientes de entregar (sin incluir los del período en que éste llega), así como el Stock de Seguridad. Si el resultado es negativo se pondría valor cero.
- En los siguientes se restan a la cantidad producida en el período los pedidos comprometidos con clientes hasta la llegada de un nuevo lote (sin incluir los del período en que llega éste).

Esta variable es de especial importancia a la hora de prometer las fechas de entrega a clientes; deberán ser tenidas en cuenta por el Departamento Comercial al objeto de asegurar que aquéllas sean viables y lo más tempranas posible. El PMP se convierte, de esta forma, en una herramienta básica de coordinación del día a día de las actividades de producción y márketing.

El proceso descrito en el presente apartado es desarrollado por otros autores a partir de las Previsiones de Venta. Por nuestra parte, consideramos que, salvo cuando, por sus características, la empresa no desarrolla el Plan Agregado, esta opción no es totalmente correcta, pues rompe en cierta forma el principio de integración de la planificación y control de la producción, al cortar la conexión Plan Agregado/Programa Maestro. Serían necesarias posteriores adaptaciones de este último para responder adecuadamente al primero. No obstante, de llevarse a cabo de esta forma, se partiría de las diferentes fuentes de demanda (como en la segunda fase que hemos desarrollado). El proceso se desarrollaría de una sola vez[33], ya que no hay necesidades derivadas del Plan Agregado a las que haya que responder, determinándose la evolución de los inventarios disponibles y colocando un lote a obtener en el PMP cuando aquéllos van a bajar por debajo de cero.

En entornos de cierta estabilidad en la demanda (en los que el flujo de producción tienda a ser continuo) y con una homogeneidad apreciable en el contenido de trabajo por producto, la elaboración del PMP se simplifica y puede basarse en tasas uniformes de fabricación que van actualizándose con los cambios en la demada. Esto es característico en la planificación con JIT en la que se pretende suavizar la demanda con objeto de obtener una producción nivelada (ver Apartado 6.3), aunque también puede emplearse con MRP (Capítulo 4) cuando se cumplen las condiciones mencionadas.

El procedimiento más común, que se denomina **Programación Maestra basada en tasas** (*Rate-based master production scheduling*) suele conllevar tres pasos fundamentales (Woodhead, 1992):

- Determinar el inventario final deseado, IFD (por productos o por familias), para cuya determinación puede tenerse en cuenta la clasificación ABC (ver Capítulo 1).
- Definir el período firme del PMP, PF.
- Establecer la tasa uniforme de producción (TP).

[33] Ver, por ejemplo, Krajewski-Ritzman (1900, págs. 520 y ss.), Larrañeta y otros (1989, págs. 209 y ss.), Waters (1991, págs. 348 y ss.).

Para calcular esta última, la producción a considerar se define como la demanda durante el horizonte de planificación (DHP) más el IFD menos el inventario inicial; dividiendo el resultado por el número de períodos del HP obtenemos la TP inicial. Cuando haya una parte firme, PF, las sucesivas tasas se obtienen como: (DHP − TP anterior × períodos de PF) / períodos restantes.

Cuando el entorno productivo cumple las condiciones mencionadas más arriba y, además, los tiempos de suministro se han reducido al mínimo, este procedimiento de cálculo del PMP puede considerarse más apropiado, simple y transparente (Scott, 1994, pág. 311).

Por último, decir que para obtener el PMP es necesario, en ocasiones, desarrollar el proceso a varios niveles. Tal es el caso de las empresas que lo realizan primero en semanas y luego en días[34] o el de aquellas otras con productos diseñados a medida con un alto número de opciones a elegir por el cliente (Fuller, 1987, pág. 186) o con Listas de Materiales Modulares.[35]

3.10. PLANIFICACION APROXIMADA DE LA CAPACIDAD

Una vez se ha determinado el PMP propuesto, y como ya indicamos en el Apartado 3.3, ha de comprobarse si es viable desde el punto de vista de la capacidad. Para ello debe compararse la capacidad que requiere su elaboración con la Disponible Planificada derivada de las condiciones establecidas en el Plan Agregado. Para analizar algunas de las técnicas a emplear, utilizaremos el ejemplo que venimos desarrollando, suponiendo que la Gerencia eligió como propuestos los PMP iniciales (Tabla 3.7). Se necesita, además, otra información que hasta ahora no ha sido necesaria, lo cual se detalla a continuación (Ejemplo 3.5).

EJEMPLO 3.5. Planteamiento del problema

La Figura 3.9 muestra los componentes y el proceso de obtención de P1 y P2, indicándose en la parte superior de cada círculo la denominación del componente y en la de abajo el número de unidades de éste que son necesarias para obtener una de nivel superior. Los componentes del último nivel son adquiridos en el exterior.

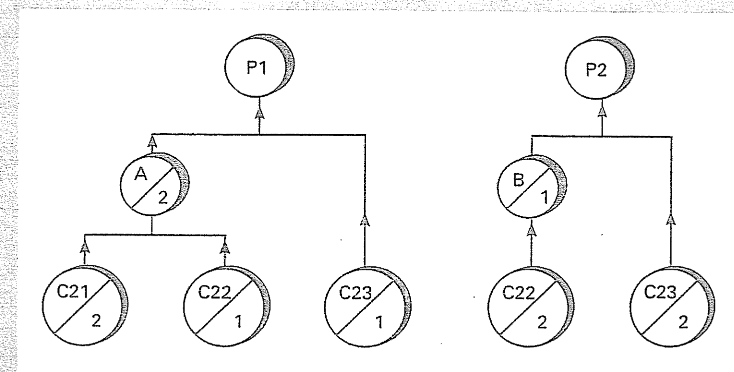


Figura 3.9. Lista de materiales de P1 y P2 (ver Apartado 4.4.2).

[34] Ver, por ejemplo, el caso de NISSAN Corp., descrito por Krajewski-Ritzman (1990, pág. 521).
[35] Esta problemática se analizará más a fondo en los Apartados 4.4.1 y 4.4.2.

Las operaciones que requiere cada uno de los componentes fabricados (A y B), así como el montaje de P1 y P2 (con detalle de los CT en que se desarrollan) vienen recogidas en las rutas representadas en la Figura 3.10.

La Tabla 3.8 recoge los datos de cada una de las operaciones, en la que los tiempos de carga unitarios han sido determinados de acuerdo con lo expuesto en el Capítulo 2 (Apéndice 2.A). En cuanto a la Capacidad Disponible, en el Plan Agregado se contempló la utilización de 141 hombres durante enero y febrero y 86 en marzo (ver Tabla 3.4), desarrollando cada uno 8 h.e./día (ver Ejemplo 3.2). Su distribución por Centros de Trabajo aparece en la Tabla 3.9. Para simplificar los cálculos, se supondrá que en todos los CT se cuenta con una misma Eficiencia y Utilización (ver Capítulo 2), lo que implica que, por cada trabajador, se dispondrá de 8 h.e. del CT al día. La Capacidad Disponible por semana en estas condiciones será: número trabajadores × 8 h.e./día × 5 días/semana.

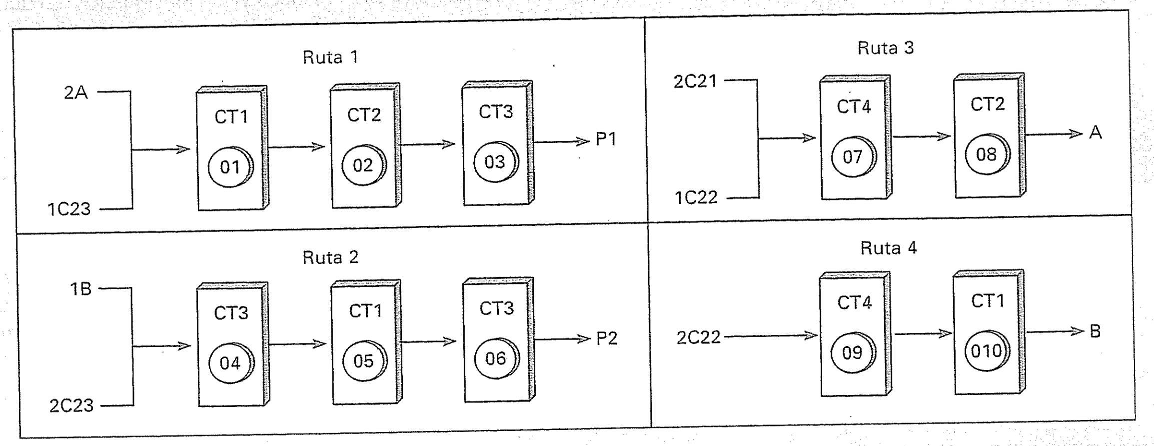


Figura 3.10. Rutas de obtención de productos finales y componentes.

Tabla 3.8. Datos de las Operaciones

RUTA (ítem, j)	Operación, i	Tiempos de carga de las operaciones en horas estándar tc_{ijk}		Centro de Trabajo K	Aprovechamiento a_i
1 (P1)	O1	tc_{1P11}	0,15	1	0,9
	O2	tc_{2P12}	0,11	2	0,95
	O3	tc_{3P13}	0,12	3	0,9
2 (P2)	O4	tc_{4P23}	0,15	3	0,8
	O5	tc_{5P21}	0,25	1	0,95
	O6	tc_{6P23}	0,16	3	0,9
3 (A)	O7	tc_{7A4}	0,03	4	0,9
	O8	tc_{8A2}	0,32	2	0,9
4 (B)	O9	tc_{9B4}	0,1	4	0,95
	O10	tc_{10B1}	0,42	1	0,9

Tabla 3.9. Datos de Capacidad Disponible en los Centros de Trabajo

CT	Capacidades/semana			
	Enero y febrero		Marzo	
	Número hombres	h.e.	Número hombres	h.e.
1	49	1.960	29	1.160
2	58	2.320	36	1.440
3	22	880	13	520
4	12	480	8	320
TOTAL	141	5.640	86	3.440

En cuanto a las posibles técnicas a emplear en este nivel de Planificación que denominamos Aproximado (o *Rough-Cut*), pueden ser diversas (ver Apartado 2.3), aunque las más difundidas (Vollmann y otros, 1991, págs. 136 y siguientes) son la CPOF o Planificación de Capacidad Usando Factores Agregados (*Capacity Planning Using Overall Factors*), las Listas de Capacidad (*Capacity Bills*) y los Perfiles de Recursos (*Resource Profiles*). Por nuestra parte, vamos a analizar las dos últimas, dado que aunque CPOF es, sin duda, la más simple de las tres, la que menos información requiere y menos cálculos implica, es también la menos exacta (de ahí que su principal aplicación esté en RRP, es decir, en la Planificación Agregada de Capacidad) y la que más inconvenientes conlleva[36].

3.10.1. Las Listas de Capacidad

Aun siendo bastante simple, esta técnica permite calcular, con criterios objetivos, las cargas que va a provocar el PMP en los distintos Centros de Trabajo, produciendo un Plan de Capacidad Prospectivo (se corrige así uno de los grandes defectos de la técnica CPOF, que lo hace en base a datos históricos). Requiere la siguiente información:

- Rutas de productos finales y componentes.
- Tiempos de carga unitarios de cada una de las operaciones y su factor de defectuosos.
- Lista de Materiales, detallando los componentes que intervienen en la obtención del producto final y sus cantidades (ver Figura 3.9).
- El Programa Maestro de Producción propuesto (o Plan Agregado, en caso de utilizarla para RRP).

Con dichos datos se determina la carga que genera en cada CT la obtención de una unidad de cada uno de los productos finales. Este **Tiempo Total de Carga** de un ítem cualquiera, j, en un CT k, TTC_{jk}, fue definido en el Capítulo 2 (Apartado 2.A.4).

EJEMPLO 3.5. (Continuación): Elaboración de las listas de capacidad

El proceso de determinación de los TTC_{P1K} y TTC_{P2K}, se puede apreciar fácilmente si consideramos el desarrollo de las operaciones de montaje de P1 y P2, así como de las rutas de sus componentes fabricados. Ello se ilustra en la Figura 3.11 (obtenida a partir de la 3.10), donde, siguiendo lo expuesto en el Capítulo 2 (Apartado 2.A.5, Figura 2.5) se ha incluido la incidencia de los factores de defectuosos de los distintos CT. En nuestro ejemplo, estos factores hacen que para obtener una unidad de P1 sea necesario procesar material (de A y C23) para 1,3 unidades, es decir, 2,6 unidades de A (=2 × ×1,3, ver Figura 3.11) y 1,3 de C23 (=1 × 1,3). Del mismo modo, las 2,6 unidades «buenas» de A implican procesar 3,21 unidades (ver Figura 3.11). Por lo que respecta a P2, el razonamiento es análogo. En la Figura 3.11 aparece, delante de cada centro de trabajo, el número de unidades que generará carga en los mismos, para las distintas operaciones; lógicamente, los items adquiridos en el exterior no generan carga alguna.

Las unidades mencionadas, multiplicadas por sus correspondientes T_{cijk}, o tiempos de carga de las operaciones en los respectivos CT (que van en la Tabla 3.8) darán las cargas generadas por aquéllas en estos últimos. Sumando todas las correspondientes a un CT para obtener una unidad de producto final (Figura 3.11) se obtendrá el correspondiente tiempo de carga total, TTC_{jk}. Hecho esto para cada CT tendremos la Lista de Capacidad del producto en cuestión de que tratamos (ver Tablas 3.10 y 3.11).

[36] Ver, por ejemplo, Wemmerlöv (1984/1, pág. 14 y ss.) o Meredith (1992, pág. 395).

Es interesante hacer notar que los resultados aquí obtenidos concuerdan con los del Plan Agregado (Ejemplo 3.2). De acuerdo con los porcentajes establecidos, cada unidad de familia se descompone en 0,6 de P1 y 0,4 de P2; si multiplicamos dichos valores, respectivamente, por la suma de los distintos TTC_{P1K} y TTC_{P2K} (véanse las Tablas 3.10 y 3.11) tendremos:

$$P1: \quad 0,6 \times (0,19 + 1,05 + 0,13 + 0,1) = 0,882$$
$$P2: \quad 0,4 \times (0,97 + 0,4 + 0,17) = 0,616$$

Si ahora sumamos los resultados obtenidos, obtendremos 1,498, lo que en realidad coincide prácticamente con las 1,5 horas estándar por unidad de familia que se utilizó como dato en el Plan Agregado del mencionado ejemplo.

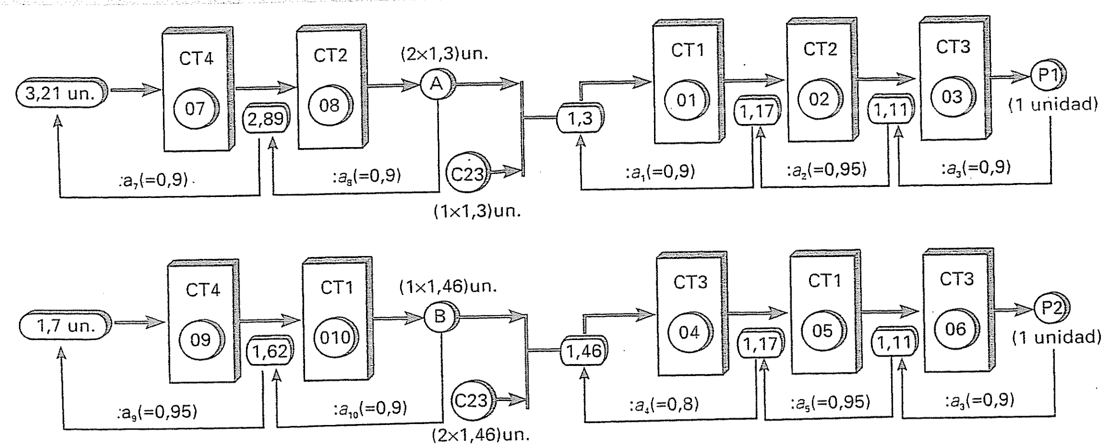


Figura 3.11. Obtención de una unidad de P1 y P2.

Tabla 3.10. Lista de Capacidad de P1

RUTA	Operación (*i*)	CT*k*	Unidades a procesar en *k*	T_{cijk}	Cargas en CT*k*			
					CT1	CT2	CT3	CT4
P1	O3	3	1,11	0,12			0,13	
	O2	2	1,17	0,11		0,13		
	O1	1	1,3	0,15	0,19			
Total para montar 1 un. de P1					0,19	0,13	0,13	0
A	O8	2	2,89	0,32		0,92		
	O7	4	3,21	0,03				0,1
Total para elaborar 2,6 un. de A					0	0,92	0	0,1
TTC_{P1k}: Total para montar un P1 y componentes					0,19	1,05	0,13	0,1

Tabla 3.11. Lista de Capacidad de P2

RUTA	Operación (*i*)	CT*k*	Unidades a procesar en *k*	T_{cijk}	Cargas en CT*k*			
					CT1	CT2	CT3	CT4
P2	O6	3	1,11	0,16			0,18	
	O5	1	1,17	0,25	0,29			
	O4	3	1,46	0,15			0,22	
Total para montar 1 un. de P2					0,29	0	0,40	0
B	O10	1	1,62	0,42	0,68			
	O9	4	1,7	0,1				0,17
Total para montar 1,46 un. de B					0,68	0	0	0,17
TTC_{P2k}: Total para montar un P2 y componentes					0,97	0	0,4	0,17

Una vez conocidos los TTC_{jk} en cada CT para cada producto final, no habrá más que multiplicarlos por cada una de las cifras que componen el PMP propuesto y acumularlos por CT y período. Se obtiene así el **Plan de Capacidad Aproximado** para cada Centro de Trabajo. Para nuestro ejemplo, los resultados se encuentran detallados en la Tabla 3.12 (fila 5 de cada CT). Lógicamente, una vez *conocida la carga necesaria* derivada del PMP propuesto, se hace necesario *compararla con las disponibilidades*, las cuales aparecen en la fila 6 de cada CT en la Tabla 3.12 (extraídas de la Tabla 3.9). Además, se ha calculado la **desviación de la capacidad necesaria con respecto a la disponible**; lógicamente, cuando este valor es negativo, implica que en el período en cuestión se precisa más capacidad, es decir, existe una sobrecarga.

Una interpretación estricta de los resultados obtenidos podría llevar a afirmar que el PMP propuesto en el Ejemplo 3.5 no es viable, pues existen sobrecargas en numerosos períodos. Sin embargo, esto no es totalmente cierto. Para una interpretación correcta es necesario realizar algunas consideraciones previas. En primer lugar, es necesario tener en cuenta que en el primer período no se ha incluido la carga necesaria para terminar los dos pedidos en curso de P1 y P2 (4.000 y 3.500 unidades, respectivamente, en la Tabla 3.7), que se reciben al final de la semana 1; esto incrementaría la carga en este período. Tampoco se consideran las disponibilidades en inventario de componentes A y B (en el PMP sólo se incluyen las de P1 y P2), ni los pedidos en curso de A y B (parte de los cuales pueden estar ya elaborados). Por todo ello, la carga de los períodos afectados por estas cuestiones no es totalmente representativa. Sólo con un plan más detallado (como el que se puede derivar de la técnica CRP (ver Capítulo 5)), se podría pormenorizar más.

En segundo lugar, hay que considerar que *no cualquier sobrecarga hace inviable al PMP*. Por ejemplo, la Capacidad Disponible empleada es sólo en jornada regular, por lo que antes de dar la sobrecarga como inaceptable, habría que ver el

valor de la Capacidad Práctica Máxima (ver Apartado 2.2.4). Cualquier sobrecarga inferior en valor absoluto a la diferencia entre esta última y la Capacidad Disponible, podría ser asumida con medidas de ajuste transitorio, con consecuencias aceptables sobre los costes. No obstante, si consideramos la cuestión que comentaremos seguidamente, quizá no sea necesario.

En tercer lugar, hay que considerar que *esta técnica no periodifica la carga.* Así, por ejemplo (ver Tabla 3.12), la generada en CT1 por un lote de 3.500 unidades de P2 a recibir en la semana 3 es de 3.395 h.e., las cuales se asignan por completo a dicha semana. Estas incluyen el montaje de 3.500 unidades de P2, que implican 1.015 h.e. (3.500 × 0,29), y la fabricación de 5.110 unidades de B (3.500 × 1,46), que consumirán 2.380 h.e. (3.500 × 0,68). Si el Tiempo de Suministro de un lote de P2 es de una semana, al igual que el de B, el lote de este último debería ser emitido a finales de la semana 1 para que, a finales de la 2, cuando hemos de emitir el de P2, estén disponibles los componentes de B. Según esto, de las 3.395 h.e. que hemos colocado en 3, sólo corresponderían a este período 1.015 h.e., pasando las restantes a la semana 2. Lo mismo ocurre con el resto del horizonte de planificación. La desviación de una semana, pues, no es representativa al no estar periodificadas las cantidades. Lo es más la **desviación acumulada, DA** (fila 8 de cada CT). Mientras ésta se mantenga positiva período a período, ello indicará que con la capacidad de una semana, más la de las semanas anteriores, pueden fabricarse las cantidades indicadas en el PMP. Si esto es así (como ocurre en nuestro ejemplo), lo más que puede ocurrir es que algunos lotes hayan de ser emitidos antes del momento en que constan en el PMP; esto no se sabrá hasta que estemos en un nivel de planificación más detallado, es decir, cuando se haya realizado la planificación de materiales y se haya desarrollado el Plan de Capacidad detallado (mediante CRP) (ver Capítulos 4 y 5). Lo que sí es claro es que, con la capacidad disponible, las cantidades que contiene el PMP se pueden obtener con una alta probabilidad en la fecha de terminación propuesta o incluso antes (lo que implica que podrán ser servidas a tiempo). Por el contrario, si en alguna de las semanas la Desviación Acumulada es negativa y, más tarde se hace positiva, cumplir el PMP implicará retrasar algún pedido (si no se quiere aumentar la capacidad disponible para el período adecuado).

Por último decir que si la Desviación Acumulada del último período es positiva, el PMP puede ser viable, quizá con pequeños ajustes (mayores cuanto más se acerque a cero aquélla y cuantos más períodos con Desviación Acumulada negativa haya), los cuales no podremos conocer hasta que desarrollemos la planificación detallada. Si la DA es negativa, pero pequeña, será necesario tomar medidas de aumento de la capacidad disponible, que podrían llegar hasta la Capacidad Práctica Máxima. Si llamamos IC a la diferencia entre ambas, en teoría podríamos cubrir una desviación acumulada negativa de IC × 12 h.e. (ya que hay 12 semanas) pero, en la práctica, este incremento no suele ser sostenible ni recomendable durante tanto tiempo. Además, hay que contar con pérdidas debidas a la coordinación entre los pedidos, por lo que será la Gerencia, para el caso concreto, la que tendrá que asumir cuánta Desviación Acumulada Negativa se puede admitir para dar luz verde al PMP propuesto.

En cuanto a las **ventajas que presenta esta técnica**, quizá las más destacadas son:

a) Las Listas son fáciles de elaborar y, una vez concluidas, podrán ser aplicadas a los diferentes PMP, sin que sea necesario actualizarlas hasta que cambie alguna de las informaciones técnicas de las que parten.

Tabla 3.12. Determinación del Plan Aproximado de Capacidad y comparación con la Capacidad Disponible

	Períodos	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
PMP	(1) P1		4.000		4.000		4.000		4.000		4.000		
	(2) P2			3.500		3.500		3.500				3.500	
CT1	(3) Carga P1 = 0,19 × (1)		760		760		760		760		760		
	(4) Carga P2 = 0,97 × (2)			3.395		3.395		3.395				3.395	
	(5) Plan Capacidad CT1 = (3) + (4)	0	760	3.395	760	3.395	760	3.395	760	0	760	3.395	0
	(6) Capacidad Estándar Disponible	1.960	1.960	1.960	1.960	1.960	1.960	1.960	1.960	1.160	1.160	1.160	1.160
	(7) Desviación = (6) − (5)	1.960	1.200	−1.435	1.200	−1.435	1.200	−1.435	1.200	1.160	400	−2.235	1.160
	(8) Desviación acumulada	1.960	3.160	1.725	2.925	1.490	2.690	1.255	2.455	3.615	4.015	1.780	2.940
CT2	(3) Carga P1 = 1,05 × (1)		4.200		−4.200		4.200		4.200		4.200		
	(4) Carga P2 = 0 × (2)												
	(5) Plan Capacidad CT2 = (3) + (4)	0	4.200	0	4.200	0	4.200	0	4.200	0	4.200	0	0
	(6) Capacidad Estándar Disponible	2.320	2.320	2.320	2.320	2.320	2.320	2.320	2.320	1.440	1.440	1.440	1.440
	(7) Desviación = (6) − (5)	2.320	−1.880	2.320	−1.880	2.320	−1.880	2.320	−1.880	1.440	−2.760	1.440	1.440
	(8) Desviación acumulada	2.320	440	2.760	880	3.200	1.320	3.640	1.760	3.200	440	1.880	3.320
CT3	(3) Carga P1 = 0,13 × (1)		520		520		520		520		520		
	(4) Carga P2 = 0,4 × (2)			1.400		1.400		1.400				1.400	
	(5) Plan Capacidad CT3 = (3) + (4)	0	520	1.400	520	1.400	520	1.400	520	0	520	1.400	0
	(6) Capacidad Estándar Disponible	880	880	880	880	880	880	880	880	520	520	520	520
	(7) Desviación = (6) − (5)	880	360	−520	360	−520	360	−520	360	520	0	−880	520
	(8) Desviación acumulada	880	1.240	720	1.080	560	920	400	760	1.280	1.280	400	920
CT4	(3) Carga P1 = 0,1 × (1)		400		400		400		400		400		
	(4) Carga P2 = 0,17 × (2)			595		595		595				595	
	(5) Plan Capacidad CT4 = (3) + (4)	0	400	595	400	595	400	595	400	0	400	595	
	(6) Capacidad Estándar Disponible	480	480	480	480	480	480	480	480	320	320	320	320
	(7) Desviación = (6) − (5)	480	80	−115	80	−115	80	−115	80	320	−80	−275	320
	(8) Desviación acumulada	480	560	445	525	410	490	375	455	775	695	420	740

b) Requiere poco tiempo de computación, pudiéndose desarrollar manualmente.
c) Permite una conexión muy clara de la carga de los CT con los pedidos que la generan, lo que facilita la elaboración de planes alternativos y la reprogramación.
d) Dar una información que, en muchos casos, será suficientemente completa para este nivel de detalle, sobre todo si se interpretan adecuadamente los resultados.

Como **inconvenientes más destacados**:

a) No considera la carga que generan los pedidos en curso de items finales.
b) No tiene en cuenta las disponibilidades y pedidos en curso de componentes, dado que no se incluyen en el PMP.
c) No considera la distribución temporal de las cargas, pues no considera que éstas se repartirán a lo largo del tiempo de suministro del producto final y de sus componentes.
d) No tiene en cuenta el dimensionado de los lotes de los componentes, pudiendo ocurrir que los necesarios para varios pedidos de los productos finales se reúnan más tarde en uno solo de los componentes (ver Capítulo 4), o que se emitan varios pedidos de componentes para un solo pedido de producto final; ello cambiaría también la periodificación de las cargas.

3.10.2. Los Perfiles de Recursos

Esta técnica viene a intentar corregir uno de los inconvenientes básicos señalados para las Listas de Capacidad: el relativo a la periodificación de las cargas. En esencia, la mayor parte del procedimiento no varía, pero una vez calculadas las cargas de los pedidos, se procede a repartirlas entre los períodos que abarca el tiempo de suministro del producto final y el de sus componentes. Requiere, pues, la misma información que la anterior, más los mencionados TS, elaborándose con ella los **Perfiles de Recursos**, también denominados por algunos autores, **Listas de Capacidad Periodificadas** (Wemmerlöv, 1984, pág. 26). Para aplicarlo a nuestro ejemplo, vamos a suponer que los tiempos de suministro son de una semana para P1, P2 y B, y de dos semanas para A. Una vez establecidas las cargas por unidad de producto final y por unidad de cada componente (Tablas 3.10 y 3.11), éstas se periodifican en base a los TS mencionados, obteniendo los recursos que muestran las Tablas 3.13 y 3.14 para P1 y P2, respectivamente.

EJEMPLO 3.5. (Continuación): Perfiles de Recursos y Plan de Capacidad Aproximado

El proceso seguido para obtener las Tablas 3.15 y 3.16 ha sido el siguiente: Para conseguir una unidad de P1 a final del período *n*, será necesario emitir el correspondiente pedido a final de *n* − 1, dado que su TS es de una semana.

Luego, a lo largo de la semana *n*, tendremos una carga de 0,19 h.e. en el CT1, 0,13 en el CT2, 0,13 en el CT3 y 0 en el CT4. Para fabricar el pedido mencionado debe llegar uno de 2,6 unidades de A al final de *n* − 1, que deberá emitirse a final de *n* − 3, dado que su TS es de dos semanas. Esto implica que la carga generada por éste último se repartirá entre los períodos (*n* − 2) y (*n* − 1) (ver Tabla 3.10: 0 h.e. en el CT1, 0,92 en el CT2, 0 en el CT3 y 0,1 en el CT4).

Tabla 3.13. Perfil de recursos de P1 (lote = 4.000)

Item	CT*k*	Carga por período				
		n − 3	*n* − 2	*n* − 1	*n*	*n* + 1
P1 (1 un.)	CT1 CT2 CT3 CT4			Emisión lote P1	0,19 0,13 0,13 0	Terminación lote P1
A (2,6 un.)	CT1 CT2 CT3 CT4	Emisión lote A	0 0,46 0 0,05	0 0,46 0 0,05	Fin lote A	× 4.000
P1 (4.000 un.)	CT1 CT2 CT3 CT4	× 4.000	0 1.840 0 200	0 1.840 0 200	760 520 520 0	

Tabla 3.14. Perfil de recursos de P2 (lotes = 3.500)

Item	CT*k*	Carga por período			
		n − 2	*n* − 1	*n*	*n* + 1
P2 (1 un.)	CT1 CT2 CT3 CT4	Emisión lote B	Emisión lote P2 Fin lote P1	0,29 0 0,4 0	Fin lote P2
B (1,46 un.)	CT1 CT2 CT3 CT4	× 3.500	0,68 0 0 0,17		× 3.500
P2 (3.500 un.)	CT1 CT2 CT3 CT4		2.380 0 0 595	1.015 0 1.400 0	

El criterio más seguido es hacer una distribución uniforme de la carga (en nuestro caso, asignar a cada uno la carga dividida por 2: 0,92/2 = 0,46 en CT2 y 0,1/2 = = 0,05 en CT4), aunque podría adoptarse otro más realista (en función del orden de paso por los CT y de las cargas que generan cada uno de ellos, así como de los tiempos de cola). No obstante, a este nivel de planificación no se debe bajar a un elevado grado de detalle y cualquier otra opción que se adopte aquí complicaría innecesariamente los cálculos. Según esto, para un lote de 4.000 unidades de P1, sólo habría que multiplicar la carga de cada período en cada CT por 4.000.

Una vez calculadas estas cargas periodificadas, no hay más que aplicarlas al PMP propuesto y acumularlas por CT y período. El resultado se establece para los CT1 y CT2 en la Tabla 3.15. En ella se puede apreciar

Tabla 3.15. Plan de Capacidad obtenido mediante Perfiles de Recursos para los CT1 y CT2

	Períodos	−1	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
PMP	P1				4.000		4.000		4.000		4.000		4.000		
	P2					3.500		3.500		3.500				3.500	
CT1	Carga P1				760		760		760		760		760		
	Carga P2				2.380	1.015	2.380	1.015	2.380	1.015			2.380	1.015	
	Plan capacidad				3.140	1.015	3.140	1.015	3.140	1.015	760		3.140	1.015	
	Capacidad disponible			1.960	1.960	1.960	1.960	1.960	1.960	1.960	1.960	1.160	1.160	1.160	1.160
	Desviación			1.960	−1.180	945	−1.180	945	−1.180	945	1.200	1.160	−1.980	145	1.160
	Desviación acumulada			1.960	780	1.725	545	1.490	310	1.255	2.455	3.615	1.635	1.780	2.940
CT2	Carga P1		1.840	1.840	2.360	1.840	2.360	1.840	2.360	1.840	2.360	1.840	520		
	Carga P2														
	Plan capacidad		1.840	1.840	2.360	1.840	2.360	1.840	2.360	1.840	2.360	1.840	520		
	Capacidad disponible			2.320	2.320	2.320	2.320	2.320	2.320	2.320	2.320	1.440	1.440	1.440	1.440
	Desviación		−1.840	480	−40	480	−40	480	−40	480	−40	−400	920	1.440	1.440
	Desviación acumulada		−1.840	−1.360	−1.400	−920	−960	−480	−520	−40	−80	−480	440	1.880	3.320

cómo, para el CT1, la Desviación Acumulada al final del horizonte de planificación coincide con la calculada en la Tabla 3.12 mediante Listas de Capacidad (ello es obvio porque la carga no varía, sólo lo hace su distribución en el tiempo). En cuanto al CT2, se observa una sobrecarga de 1.840 en el período 0, lo que indica que, o bien tiene que haber en curso un lote de A (que es el que la origina), o bien éste debe estar terminado y disponible en inventario. En el primer caso, del lote en curso deberían haberse desarrollado ya (antes del comienzo de la semana 1) 1.840 h.e. para que la programación anterior a este horizonte hubiera sido correcta.

Las situaciones mencionadas al final del ejemplo se ponen de manifiesto al no considerar tampoco esta técnica las disponibilidades o pedidos en curso de componentes. Si no fuera por esta razón, es evidente que, o bien ha habido errores en la planificación pasada, o bien el Sistema no ha sido lo suficientemente flexible para absorber los imprevistos. Fuera cual fuese el motivo, ahora sería difícil cumplir el PMP si no se retrasa el pedido de 4.000 unidades de P1 a la semana 3. Por lo demás, este técnica presenta las mismas ventajas que las Listas de Capacidad aunque, eso sí, complica notablemente los cálculos (sobre todo para desarrollarla manualmente), además de interferir algo la conexión entre las cargas y los pedidios del PMP, mucho más clara en el otro caso.

No obstante, se corrige el inconveniente de las Listas de Capacidad relativo a la distribución de las cargas en el tiempo, dado que considera los Tiempos de Suministro y periodifica las cargas dentro de él. Sin embargo, esta distribución no es quizá, lo suficientemente exacta como para paliar las desventajas que acabamos de comentar. Primero, porque la distribución se hace siempre con criterios aproximados y, segundo, porque sigue sin poder tener en cuenta el dimensionado de los lotes de componentes que, normalmente, harían que incluso un buen criterio de periodificación dejara las cargas establecidas muy lejos de su distribución real en el tiempo (ver Capítulo 4).

3.11. CONSIDERACIONES FINALES: IMPORTANCIA DE LA COORDINACION DE LAS DISTINTAS AREAS EMPRESARIALES EN LA PLANIFICACION AGREGADA Y MAESTRA

Antes de finalizar el presente capítulo, conviene resaltar que *el establecimiento del Plan Agregado debe estar marcado por la coordinación y el acuerdo entre las distintas funciones empresariales*, aspecto que comentamos seguidamente.

El **Departamento Comercial** es fundamental a la hora de establecer las necesidades de producción, pues de él depende la cartera de clientes y la determinación de las previsiones de demanda a medio y corto plazo. Las necesidades mencionadas deben responder al Plan Táctico Comercial, elaborado para el mismo horizonte de planificación que el Plan Agregado de Producción. La importancia de la exactitud en las previsiones ya fue comentada en el Capítulo 1; si están infladas darán lugar a la planificación de recursos y producción en exceso (que no podrá ser vendida); si están por debajo de la realidad, se producirá el efecto contrario y provocará pérdida de ventas o consecución de recursos suplementarios a última hora. En ambos casos, las repercusiones negativas sobre los costes son claras. Por su parte, el Plan Táctico definido por el **Departamento Financiero** también deberá ser coherente con los anteriores, pues los ingresos derivarán del Plan Comercial y los gastos por compras, volúmenes de inventario, etc., del de Producción. En cuanto a las opciones de ajuste transitorio, también debe haber colaboración

interfuncional. Así, por ejemplo: **Personal** en cuanto a contrataciones y despidos, empleo eventual, horas extras, programación de vacaciones, etc; **Marketing** en cuanto a productos servidos con retraso, desplazamientos de demanda, etcétera; **Finanzas** en cuanto a los efectos económicos de las distintas opciones; **Contabilidad** debe suministrar la mayoría de los datos sobre costes, debiendo cuidar de la exactitud de los mismos, pues, si ésta no se da, podría dar lugar a una incorrecta elección de alternativas. Por lo que respecta a los objetivos tácticos, es evidente que el Plan elegido influirá no sólo en los de Producción, sino en los financieros y comerciales.

Queda claro, pues, que, aunque los cálculos que llevan el Plan Agregado serán desarrollados por el Departamento de Operaciones, las decisiones tomadas en las distintas fases del proceso deben ser negociadas y acordadas en equipo. Se garantizará así la coordinación e integración empresarial, tanto a nivel vertical como horizontal, lo cual es esencial para la consecución de los objetivos de la firma.

También, en el nivel de programación maestra, la interconexión y coordinación funcional es importante. Las distintas previsiones de demanda y su concreción a partir de la cartera de pedidos corren a cargo del **Departamento de Marketing**, el cual debe cuidar por su exactitud. Además, dicho Departamento es responsable ante los clientes del cumplimiento de las cantidades y fechas de entrega que aparecen en el Programa Maestro. Esta responsabilidad no debe provocar el falseamiento de cantidades o/y fechas ante Producción con objeto de «asegurarse» frente a la clientela; las repercusiones en cadena que ello produciría a lo largo de todo el subsistema productivo (ver Capítulo 4), con implicaciones en otras áreas funcionales (personal, compras, finanzas, etc.), justifican nuestra afirmación. Dado que el Programa Maestro provocará un conjunto de flujos monetarios (los ingresos por ventas/cobros derivados de los mismos y los costes por recursos empleados (mano de obra, materiales, etc./pagos correspondientes), el **Area financiero-contable** estará íntimamente relacionada con aquél. Las necesidades de mano de obra y de materiales generados a partir del Programa Maestro (ver Capítulo 4) hacen obvias las interacciones con el **Departamento de Personal** y con el de **Compras**, respectivamente. Por último, dado el papel que juega el PMP en la gestión de la empresa, la relación entre el Departamento de Producción y el de Marketing con la **Alta Dirección** se vuelve indispensable.

REFERENCIAS Y BIBLIOGRAFIA

ADAM, E. A., y EBERT R. J.: «Production and Operations Management», Ed. Prentice Hall, 1.992.

ANDERSON, SCHROEDER, TUPY y WHITE: «Material Requirements Planning. A Study of Implementation and Practices», APICS, 1981.

AQUILANO, N. J., y CHASE, R. B.: «Fundamentals of Operations Management», Richard D. Irwin, 1991.

AXSATER, S., y JOHNSON, H.: «Aggregation and Dissagregation in Hierarchical Production Planning», *European Journal of Operations Research*, vol. 17, núm. 3.

BARMAN, J.; TERSINE, R. J., y BURCH, E. E.: «Perfomance Evaluation of the P.S.H. and the LDR with forecast errors», *Journal of Op. Management*, vol. 9, 1990.

BARMAN, S., y TERSINE, R. J.: «Sensitivity of cost coefficient errors in aggregate production planning», *Omega*, vol. 19, 1991.

BARMAN, S., y TERSINE, R. J.: «Comparing two aggregate Planning Models», *Omega*, vol. 21, núm. 5, 1993.

BECKMAN-BOLLER-HAMILTON-MONROE: «Using Manufacturing as a Competitive Weapon: the Development of Manufacturing Strategy», en MOODY, P. E.: «Strategic Manufacturing: Dynamic New Directions for the 1990's», The Business One Irwin/Apics Series in Production Management, 1990.

BERRY, VOLLMANN y WHYBARK: «Master Production Scheduling. Principles and Practice», APICS. 1983.

BITRAN, G. R., y HAX, A. C.: «Dissagregation and Resources Allocation Using Convex Knapsack Problems With Bounded Variables», *Management Science*, núm. 27, págs. 431 y ss.

BOLANDEL, HEARD, SEWARD y TAYLOR: «Manufacturing Planning and Control in Process Industries», APICS, 1981.

BOWMAN, E. H.: «Production Planning by the Transportation Method of Linear Programming», *Journal of Operations Research*, vol. 4 núm. 1, febrero 1956.

BOWMAN, E. H.: «Consistency and Optimality in Material Decisions Making», *Management Science*, vol. 9, núm 2, 1963.

BOYER, J. E.: «How to Calculate Replacement Factors in a Remanufacturing Industry», 31 St Annual Intern. Conference Proceedings, APICS, 1988.

BROWNE, HARHEN, SHIVNAN: «Production Management Systems: A CIM Perspective», Addison-Wesley, 1988.

COMPANYS PASCUAL, R.: «Planificación y Programación de la Producción», Colección Productica, Marcombo, 1989.

CHU, E.: «Using Lotus 1-2-3 to Teach MRP», 30 th Annual Intern. Conference Proceed., APICS, 1987.

CHUNG, CHEN-UA: «Planning Horizons For Master Production Scheduling», *Jrl. of Operations Management*, vol. 4, núm. 4, 1984.

DADA, M., y SRIKANTH, K. N.: «Monopolistic Pricing and the Learning Curve: an algorithmic approach», *Operations Research*, vol. 38, núm. 4, 1990.

DELURGIO, S. A., y BHAME, C.D.: «Forecasting Systems for Operations Management», Richard D. Irwin, 1991.

DILWORTH, J. B.: «Production and Operations Management. Manufacturing and Services», McGraw-Hill, 1993.

ELMALEH, J., y EILON, S.: «A new approach to production smoothing», *International Journal of Production Research*, 12, 1974.

FULLER, THOMAS, H.: «Microcomputers in Production and Inventory Management», Dow Jones-Irwin/APICS Series in Production Management, 1987.

GAITHER, N.: «Production and Operations Management», The Dryden Press, 1992.

GARCÍA, S., y GARCÍA J. A.: «Medición de la capacidad en configuraciones productivas por funciones: los tiempos de carga unitarios», *Alta Dirección*, núms. 186 y 187, 1994.

GARWOOD, D.: «Stop before you use the Bill Processor», APICS, 2.° trimestre, 1970.

HAX, MEAL: «Hierarchical Integration of Production Planning and Scheduling», en GEISLER (ed.), *TIMS Studies in Management Science*, vol. I, North-Holland American Elsevier.

HEIZER, J., y RENDER, B.: «Production and Operations Management», Allyn and Bacon, 1991.

HILLER, R. S., y SHAPIRO, J. F.: «Optimal Capacity Expansion Planning when There are Learning effects», *Management Science*, vol. 33, núm. 9, 1986.

HOLT, MODIGLANI, MUTH y SIMON: «A linear decision rule for production and employment scheduling», *Management Science*, octubre 1955.

HOLT, MODIGLANI, MUTH y SIMON: «Planning Production Inventories and Work force», Prentice Hall, 1960.

JONES, C. H.: «Parametric production Planning», *Management Science*, vol. 13, núm. 11, 1967.

KRAJEWSKI, RITZMAN: «Operations Management. Strategy and Analysis», Addison Wesley, 1990.

KUNREUTHER, H. C., y MORTON, T. E.: «Planning Horizons for Production Smoothing with Deterministic Demands (I)», *Management Science*, vol. 20, núm. 1, 1973.

LAFORGE y STURR: «MRP Practices in a Random Sample of Manufacturing Firms», *Production and Inventory management*, vol. 27, núm. 3, 1986.

LARRAÑETA, ONIEVA, LOZANO: «Métodos modernos de gestión de la producción», Alianza Universidad, 1988.

LEE, W. B., y KHUMAWALA, B. M.: «Simulation Testing of Aggregate Production Planning Models in an Implementation Methodology», *Management Science*, vol. 20, núm. 6, febrero 1974.

LEIMAINS, E.: «P&I Management Education for the 90's», 31 St Annual International Conferecence Proceedings, APICS, 1988.

LIN, MOODIE: «Hierarchical Production Planning Systems for a Modern Steel Manufacturing Systems» *International Journal of Production Research*, vol. 27, núm. 4.

MACHUCA, J. A. D.; GARCÍA, S.; DOMÍNGUEZ, M. A.; RUIZ, A., y ALVAREZ, M. J.: «Dirección de Operaciones: Aspectos estratégicos en la producción y en los servicios», McGraw-Hill, 1994.

MCLAIN, J. O., y THOMAS, L. J.: «Horizons effects in Aggregate production planning with seasonal demand», *Management Science*, vol. 23, núm. 7, 1977.

MCLAIN, THOMAS y MAZZOLA: «Operations Management. Productions of Goods and Services», Prentice Hall, 1992.

MALKO, R.: «Master Scheduling, a Key to Results» en *Master Production Scheduling Reprints*, APICS, 1977.

MARANKA, P.: «Master Schedule A User Applies the Theory», en *Master Production Scheduling Reprints*, APICS, 1977.

MELLICHAMP, J. M., y LOVE, R. L.: «Production Switching Heuristic for the aggregate planning problem», *Management Science*, 24, 1978.

MEREDITH, J. R.: «The Management of Operations: A Conceptual Emphasis», John Wiley & Sons, 1992.

MURDICK, RENDER y RUSELL: «Service Operations Management», Allyn and Bacon, 1990.

ORLICKY, J.: «Material Requirements planning», McGraw-Hill. 1984.

PENDLETON, W. E.: «MRP II Begins With the Strategic Business Plan», Interfaces Seminar Proceed., APICS, 1980.

PETERSON, R., y SILVER, E. A.: «Decision Systems for Inventory Management and Production Planning», John Wiley & Sons, 1979.

PLOSSL, G.: «Managing in the New World of Manufacturing», Prentice Hall, 1991.

PLOSSL y otros: «The Role of Top Management in the Control of Inventory», Reston, 1979.

SCOTT, B.: «Manufacturing Planning Systems», Ed. McGraw-Hill, 1994.

SMITH, S. B.: «Training Aids. Type of Schedules», APICS, 1983.

STARR, M. K.: «Operations Management», Prentice Hall, 1989.

STEVENSON, W. J.: «Production and Operations Management», Richard D. Irwin, 1990.

TAUBERT, W. H.: «A Search Decision Rule for the Aggregate Scheduling Problem», *Management Science*, febrero 1968.

VERGIN, R. C.: «Production Scheduling under Seasonal Demand», Journal of Industrial engineering, vol. 17, núm. 5, 1966.

VOLLMANN, BERRY y WHYBARK: «Sistemas de Planificación y Control de la Fabricación», Tecnologías de Gerencia y Producción, S. A., 1991.

WALLACE, THOMAS, F.: «MRP II: Making It Happen», Oliver Wight Lted., 1985.

WATERS, C. D. J.: «An Introduction to Operations Management», Addison Wesley, 1991.

WEMMERLÖV, U.: «Interviews With Thirtheen American Companies With Experience of MRP» en *Report 3001*, Department of Industrial Management, Lund Institute of Technology, Sweden, 1977.

WEMMERLÖV, U.: «Capacity Management Techniques», APICS, 1984/1.

WEMMERLÖV, U.: «Case Studies in Capacity Management», APICS, 1984/2.

WIGHT, O. W.: «MRP II: Unlocking America's Productivity Potential», Oliver Wight Ltd., 1984.

WINTERS, P. R.: «Constrained Inventory Rules for Production Smoothing», *Management Science*, vol. 8, núm. 4, 1962.

WOODHEAD, R.: «Rate based Master Production Scheduling for repetitive make-to-stock manufacturing», *B.P.I.C.S. Control*, febrero, 1992.

CAPITULO 4

LOS SISTEMAS MRP (I): EL MRP ORIGINARIO

4.1. INTRODUCCION A LOS SISTEMAS MRP

La gestión de stocks que podríamos denominar clásica (ver Capítulo 13) ha venido ocupando un lugar preponderante en la teoría, e incluso en la práctica, debido a razones históricas y a que su útil básico, la estadística matemática, era totalmente conocido y estaba perfectamente asimilado en el ámbito académico.

Pero lo cierto es que los métodos clásicos de gestión de inventarios, que resultan adecuados cuando la demanda de los bienes es **independiente**, o sea, sujeta a las condiciones del mercado y no relacionada con la de otros artículos, son inadecuados en otros contextos, concretamente cuando la demanda de los artículos en cuestión es **dependiente**, es decir, no está sujeta directamente a las condiciones del mercado, sino que está relacionada con otros items de un grado de complejidad superior. Así, en los **sistemas de producción multifásicos**, se parte del procesamiento de las materias primas y se van incorporando y montando innumerables componentes interrelacionados, formando subconjuntos cada vez más complejos y dando lugar a una serie de niveles que llevarán al producto final. En dicho contexto, el consumo de partes, componentes, subconjuntos, etc., depende directamente de las cantidades que hay que fabricar de los conjuntos más complejos en los que se integran.

En estos casos no es necesario prever la **demanda**, sino que ésta puede ser calculada prácticamente **con certeza** a partir del **Programa Maestro de Producción**, en el que se indica la cantidad que hay que obtener de cada producto final así como las fechas de entrega de las mismas. Por otra parte, gracias al *Estudio del Trabajo* [1], se conocen las fases necesarias para llegar al producto final y, por tanto, cuáles y cuántos son los componentes que lo integran, así como sus interrelaciones; es decir, cuál es la estructura del producto, que se traduce en la denominada *lista de materiales* (ver Apartado 4.4.2).

Por otra parte, la demanda de los distintos componentes no suele ser continua. Ello es debido a que en este tipo de producción es común la fabricación por lotes; de acuerdo con ello, cuando se solicita la elaboración de un lote, todos los componentes y materiales necesarios para el mismo son pedidos en un momento concreto y en la cantidad necesaria. Se crea así una **demanda discreta y discontinua**, con frecuencia a saltos irregulares, con lo cual las técnicas clásicas, que

[1] Ver J. A. D. Machuca y otros (1994, Capítulo 6).

trabajan con valores medios y que suponen continuidad en la demanda, resultan en gran medida ineficaces, trayendo consigo a menudo tanto la aparición de rupturas como el mantenimiento de stocks medios innecesariamente elevados.

Además, cuando se necesitan diversos elementos para constituir un conjunto, la **gestión de inventarios** de los componentes no debe hacerse de forma aislada, sino **coordinadamente**. Imaginemos, por ejemplo, un producto que tiene 20 componentes y cuyos inventarios gestionamos de forma independiente mediante las técnicas clásicas. Supongamos, además, que se consigue, para cada uno de ellos que las rupturas de stocks sean como máximo del 5 por 100 o, lo que es lo mismo, que no falten stocks en el 95 por 100 de los casos. Dada la interrelación existente entre los distintos componentes, basta con que falte uno de ellos para que no pueda construirse el conjunto completo. Estadísticamente esto quiere decir que la probabilidad de que la producción se lleve a cabo sin problemas es de $(0{,}95)^{20} = 0{,}36 = 36$ por 100, lo cual implica que, posiblemente, en un 64 por 100 de ocasiones faltará al menos un elemento para formar el conjunto en el tiempo deseado.

En un contexto como el mencionado, con demanda irregular, discreta y dependiente (y, por tanto, conocida prácticamente con certeza, tanto en cantidad como en tiempo), la *meta fundamental* que hay que alcanzar es la de *disponer del stock necesario justo en el momento en que va a ser utilizado. El énfasis debe ponerse más en el cuándo pedir que en el cuánto*, lo cual hace que sea más necesaria una técnica de programación de inventarios que de gestión de los mismos; el *objetivo básico*, pues, no es vigilar los niveles de stocks como se hace en la gestión clásica, sino *asegurar su disponibilidad en la cantidad deseada, en el momento y lugar adecuados.*

La gran cantidad de datos que hay que manejar, y la enorme complejidad de las interrelaciones entre los distintos componentes, trajeron consigo que antes de los años sesenta no existiese forma satisfactoria de obtener el objetivo mencionado en el párrafo anterior. Ello propició que las empresas siguiesen utilizando los stocks de seguridad y las técnicas clásicas, así como métodos informales, con objeto de intentar evitar en lo posible problemas en el cumplimiento de la programación debido a falta de stocks; por desgracia, no siempre conseguían sus objetivos, aunque casi siempre incurrían en elevados costes de posesión.

Hay que esperar a los años sesenta para que la aparición del ordenador abra las puertas al MRP (planificación de las necesidades de materiales) que, como veremos más adelante, es más que una simple técnica de gestión de inventarios. No se trata de un método sofisticado surgido del ambiente universitario, sino que, por el contrario, es una técnica sencilla, que procede de la práctica y que, gracias al ordenador, funciona y deja obsoletas las técnicas clásicas en lo que se refiere al tratamiento de artículos de demanda dependiente. Los sistemas MRP siguen el enfoque jerárquico mencionado en el Capítulo 1 y nacen como una técnica informatizada de gestión de stocks de fabricación y de programación de la producción, capaz de generar el Plan de Materiales a partir de un Programa Maestro de Producción (PMP). El texto básico que lo desarrolla se debe a J. Orlicky y se publica en 1975, siendo su aparición en los programas académicos relativamente reciente. La popularidad creciente de esta técnica es debida no sólo a los indiscutibles éxitos obtenidos, sino también a la labor publicitaria realizada por la APICS (*American Production and Inventory Control Society*), que ha dedicado un considerable esfuerzo para su expansión y conocimiento, encabezado por profesionales como J. Orlicky, O. Wight, G. Plossl y W. Goddard. Todo ello ha

propiciado que el número de empresas que utilizan esta técnica haya crecido de forma rapidísima, contándose por miles las que actualmente lo utilizan en diferentes partes del mundo.

Sin embargo, el MRP, en su forma originaria, no estaba exento de problemas. En primer lugar, la importancia de la exactitud del PMP para lograr resultados correctos con el MRP llevó a la incorporación de un módulo de Programación Maestra de la Producción a los paquetes de *software*. Por otra parte, la programación se realizaba sin considerar las posibles restricciones de capacidad y las posibles dificultades derivadas de la ejecución de los planes de materiales en los talleres. Debido a ello, se empezaron a utilizar en paralelo técnicas de Planificación de Capacidad en los diferentes niveles (por ejemplo, *Capacity Bills Resource Profils* y *Capacity Requirements Planning*). Ello mejoraba los resultados, pero faltaba aún la integración real y el uso de una base de datos común. Del mismo modo se desarrollan de forma complementaria técnicas de gestión de talleres (*Shop Floor Control*) para poder controlar las prioridades y determinar el ordenamiento de los distintos trabajos en las unidades de producción.

Tras casi 15 años de experiencia en MRP, el paso siguiente fue lógico e inevitable: la integración de los sistemas MRP originarios, con las técnicas de Planificación de Capacidad y las de Gestión de Talleres, dando lugar a los que se denominarían **sistemas MRP de bucle cerrado** (BC), los cuales realizan de forma integrada y coordinada las actividades mencionadas, permitiendo además la realimentación desde el nivel de ejecución al de planificación. De esta forma se aconsejarán medidas coyunturales o, en su caso, estructurales, para compatibilizar la capacidad necesaria y la disponible; en el caso de que ello no sea posible, se alterará el Plan de Materiales o/y el Programa Maestro de Producción hasta lograr la necesaria factibilidad.

Los sistemas MRP de BC significaron un gran avance hacia la integración de la gestión empresarial, pero aún quedaban fuera importantes áreas empresariales. Sucesivos desarrollos han ido integrando otros campos, tales como Finanzas o Marketing, en un proceso aún en evolución. Estos nuevos sistemas se denominan **Planificación de los Recursos de Fabricación** (*Manufacturing Resource Planning*) y son conocidos como **MRP II**, integrando más o menos áreas de la empresa en función de las características de ésta y del paquete concreto de *software* que se emplee.

Como hemos podido observar, **los sistemas MRP** no son sólo técnicas para la planificación de recursos, sino que representan una **verdadera filosofía de gestión integrada y jerárquica**. Una de las principales razones de la rápida adopción de dichos sistemas ha sido el que posibilitan la creación de una base de datos centralizada e informatizada y la coordinación de las distintas funciones de la firma, lo cual es esencial para dirigir correctamente una empresa. Así pues, el atractivo de MRP II no reside sólo en su papel de soporte de la toma de decisiones, sino en su papel integrador dentro de la estructura de una empresa manufacturera.

No todas las firmas usuarias de sistemas MRP lo emplean con el mismo grado de desarrollo ni obtienen la misma calidad en sus resultados. En función de éstos, las empresas suelen clasificarse en clases A, B, C, y D. Aunque fue Wight el que introdujo en 1977 este concepto, quizá la descripción más clara de los distintos tipos sea la desarrollada por Wallace (1984, págs. 8 y 232), la cual resumimos en el Cuadro 4.1. Muchas empresas exitosas, tras un lógico proceso evolutivo de aprendizaje y afianzamiento, llegaron de la clase D a la A a través de las otras fases intermedias.

CARACTERISTICAS	CLASE / % eficiencia
— Uso del sistema para gestionar la empresa — Trabaja en todas, o virtualmente todas, las áreas de la empresa — Rendimiento excepcional	A 90-100
— Uso del sistema para programar pedidos y cargas — Trabaja fundamentalmente en fabricación y materiales — Muy buenos resultados	B 70-90
— Uso del sistema para emitir pedidos — Trabaja fundamentalmente en fabricación y materiales — Muy regulares a buenos	C 50-70
— Trabaja en proceso de datos y dista mucho de los demás — Es contemplado como otro fracaso del ordenador — Resultados: desilusión, frustración y derroche de tiempo y dinero	D <50

Cuadro 4.1. Clasificación de las empresas usuarias de MRP

4.2. UN EJEMPLO SENCILLO

Antes de entrar en un desarrollo más profundo del MRP, consideramos de utilidad ilustrar, mediante un sencillo ejemplo, la idea básica que preside el aspecto técnico de este enfoque.

EJEMPLO 4.1. Ejercicio simplificado de explosión de necesidades

Imaginemos un producto, A, formado a partir de dos subconjuntos B y C, a razón de tres unidades del primero y dos del segundo. A su vez, B se obtiene a partir de dos unidades del componente D y una del E, mientras que C procede de una unidad del elemento F y del procesamiento de tres unidades de la materia prima G. La estructura de fabricación y montaje representativa del producto aparece, en forma de árbol, en la Figura 4.1.

Mediante un simple cálculo podemos deducir las necesidades de cada componente a partir de la cantidad que debe fabricarse de A, que supondremos igual a 100. De acuerdo con ello, tendremos:

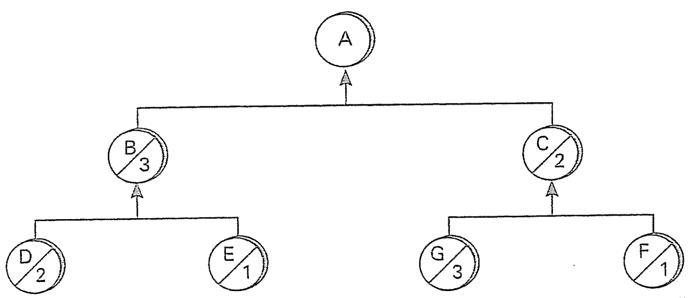


Figura 4.1. Estructura de fabricación y montaje del producto A.

Número de unidades de:
B: 3 × número de unidades de A = 3 × 100 = 300.
C: 2 × número de unidades de A = 2 × 100 = 200.
D: 2 × número de unidades de B = 2 × 300 = 600.
E: 1 × número de unidades de B = 1 × 300 = 300.
F: 1 × número de unidades de C = 1 × 200 = 200.
G: 3 × número de unidades de C = 3 × 200 = 600.

Este proceso de cálculo de los distintos componentes a partir del plan de fabricación, siguiendo las indicaciones de la estructura de fabricación y montaje, es conocido como **explosión de las necesidades**.

Consideremos a continuación el tiempo necesario para obtener cada uno de los elementos, bien sea del suministro externo cuando se trate de un artículo comprado en el exterior, bien de la fabricación o montaje externo, cuando se obtenga internamente. Por simplificar, supondremos que dicho tiempo es igual a una semana para todos ellos, excepto para el G, en el que vale dos semanas. Si conocemos, además, el momento en que se desean las 100 unidades de A, podemos obtener la programación de los pedidos de los distintos componentes, tal como ilustra la Tabla 4.1, en la que se ha supuesto que A, se requiere al final del período 6. Como vemos, la idea básica de los sistemas MRP no es nueva, lo que sí es reciente es la posibilidad de desarrollarla para cientos e incluso miles de artículos gracias al empleo del ordenador, lo que manualmente resultaba del todo imposible.

	Períodos	1	2	3	4	5	6
A	Cantidad requerida						100
	Emisión del pedido					100	
B	Cantidad requerida					300	
	Emisión del pedido				300		
C	Cantidad requerida					200	
	Emisión del pedido				200		
D	Cantidad requerida				600		
	Emisión del pedido			600			
E	Cantidad requerida				300		
	Emisión del pedido			300			
F	Cantidad requerida				200		
	Emisión del pedido			200			
G	Cantidad requerida				600		
	Emisión del pedido		600				

Tabla 4.1. Explosión de necesidades del producto A.

Lógicamente, el tiempo necesario para obtener todas las partes debe ser, a lo sumo, igual al tiempo disponible entre el momento actual y aquel en que es necesitado el conjunto A. **El gráfico de tiempos de fabricación y montaje** (Figura 4.2) puede obtenerse fácilmente a partir del árbol de fabricación (Figura 4.1). Cada línea horizontal está relacionada con un ítem concreto, indicando la longitud de la misma el tiempo de suministro correspondiente. El principio de los distintos segmentos representa el momento en que hay que pedir los elementos externos (compras) o los internos (fabricación y montaje); el final de cada uno de ellos muestra los momentos de entrega de los mismos. Puede observarse que, si se programa hacia atrás desde el momento en que es requerido el producto A, el tiempo total de ejecución queda dentro de los límites admisibles, como ya sabíamos tras la explosión de necesidades.

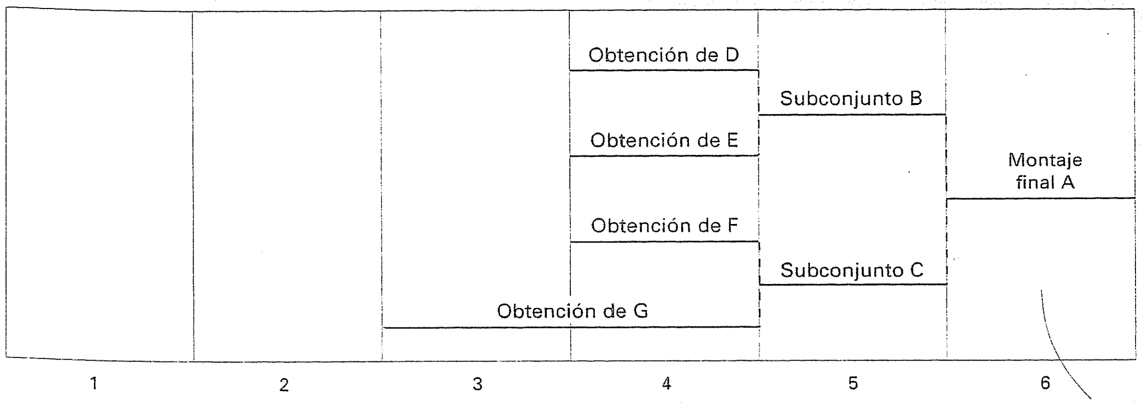


Figura 4.2. Gráfico de tiempos de fabricación y montaje del producto A.

4.3. ESQUEMA BASICO DEL MRP ORIGINARIO: DEFINICION Y CARACTERISTICAS DEL SISTEMA

En el ejemplo precedente, el sistema MRP partía de un conjunto de informaciones básicas:

- Las cantidades del producto final a elaborar con indicación de las fechas previstas de entrega, lo cual no es más que el **Programa Maestro de Producción.**
- La estructura de fabricación y montaje del artículo en cuestión, que recibe el nombre de **Lista de Materiales**.
- Datos sobre los distintos items, como, por ejemplo, los tiempos de suministro y otros que, por lo simplificado del ejemplo, no tuvimos en cuenta (existencias disponibles en almacén, recepciones programadas, etc.). Todos ellos se recogen en el denominado **Fichero de Registro de Inventarios.**

Dichas **entradas** eran procesadas por el programa de MRP que, mediante la explosión de necesidades, daba lugar al denominado **Plan de Materiales**, indicativo de los pedidos a fábrica y a compras, según que el origen del ítem demandado fuese interno o externo. Dicho plan forma parte de los denominados **informes primarios**, los cuales constituyen una de las **salidas del MRP**. Las otras son los

denominados **informes secundarios** o residuales y las **transacciones de inventarios.** Estas últimas sirven para actualizar el Fichero de Registro de Inventarios en función de los datos obtenidos en el proceso de cálculo desarrollado por el MRP.

La Figura 4.3 muestra gráficamente el esquema básico de funcionamiento expuesto en los párrafos anteriores. Se ve claramente la similitud existente con la parte relativa a la Programación de Componentes de la Figura 1.4 (Capítulo 1), donde describíamos la estructura de un sistema jerárquico de planificación de producción. No se considera aquí la capacidad, pues estamos tratando ahora el MRP originario; este aspecto será abordado en el próximo capítulo cuando tratemos el MRP de bucle cerrado. En los próximos apartados desarrollaremos cada uno de los elementos mencionados.

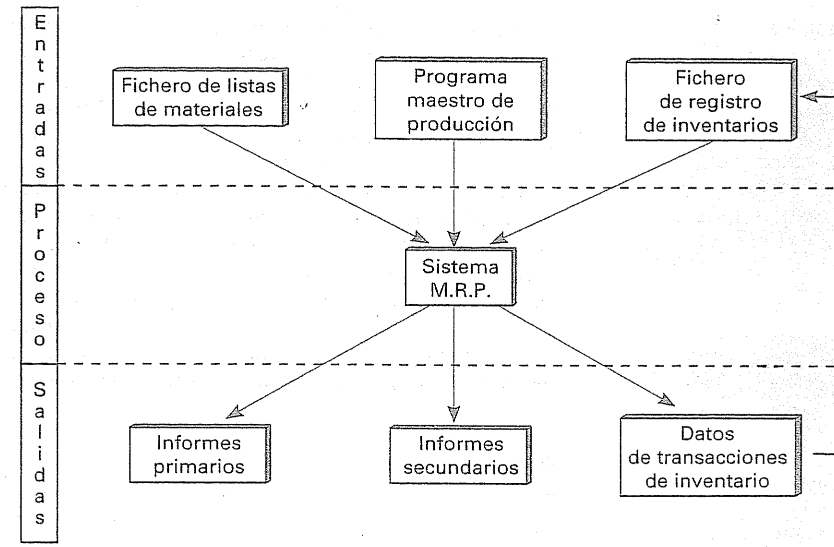


Figura 4.3. Esquema básico del MRP originario.

Con lo hasta aquí expuesto, podemos ya definir el sistema MRP originario y enumerar sus características básicas. Quizá la definición más difundida es la que lo conceptualiza como *un sistema de planificación de componentes de fabricación que, mediante un conjunto de procedimientos lógicamente relacionados, traduce un Programa Maestro de Producción en necesidades reales de componentes, con fechas y cantidades.*

En cuanto a las características del sistema, se podrían resumir en:

1. Está *orientado a los productos*, dado que, a partir de las necesidades de éstos, planifica las de componentes necesarios.
2. Es *prospectivo*, pues la planificación se basa en las necesidades futuras de los productos.
3. Realiza un *decalaje de tiempo de las necesidades* de items en función de los tiempos de suministro, estableciendo las fechas de emisión y entrega de pedidos. En relación con este tema, hay que recordar que el sistema MRP toma el TS como un dato fijo, por lo que es importante que éste sea reducido al mínimo antes de aceptarlo como tal (ver Apartado 1.4.2.3).

4. *No tiene en cuenta las restricciones de capacidad*, por lo que no asegura que el plan de pedidos sea viable.
5. Es una *base de datos integrada* que debe ser empleada por las diferentes áreas de la empresa.

4.4. ENTRADAS FUNDAMENTALES AL SISTEMA MRP

4.4.1. El Programa Maestro de Producción, PMP (*Master Production Schedule*)

Esta entrada al MRP ya fue estudiada en el capítulo anterior (Apartado 3.8), por lo que aquí sólo tocaremos brevemente algunos aspectos relativos a entornos MRP. Recordemos que procede de la desagregación de las unidades de familia del Plan Agregado a productos concretos para un horizonte de planificación que normalmente oscila entre 40 y 52 semanas[2]. En cualquier caso, éste debe ser mayor que el tiempo de suministro acumulado procedente de los aprovisionamientos, fabricación, submontajes y montajes necesarios para obtener los productos finales.

El horizonte de planificación se subdividirá, en general, en períodos o **cubos de tiempo** semanales. Sin embargo, es posible que no todo él se descomponga en períodos idénticos, pudiendo ocurrir que las porciones más alejadas en el tiempo se expresen en meses, o incluso en trimestres. *Del programa maestro depende la programación de componentes y, con ella, la de personal, equipos, compra de materiales, etc.*, necesarios para llevarlo a cabo. Debido a ello, y con objeto de evitar los problemas que se derivarían de posibles cambios en el PMP, debe intentarse que la primera parte de éste (varias semanas) permanezca invariable o, como suele decirse en la terminología característica del MRP, **firme o congelada.** Esta parte suele calcularse sumando los tiempos de suministro más largos de cada nivel de la Lista de Materiales; el resto del PMP se considera **abierto** a posibles variaciones. De esa forma, el Plan de Materiales derivado de la parte firme del PMP también queda congelado, garantizando una cierta estabilidad en el nivel de ejecución. El departamento de Marketing, íntimamente ligado al PMP, debe tomar conciencia de esta necesidad. Al transcurrir el tiempo, cada semana que pase provoca la puesta al día del PMP, eliminándose la primera semana y añadiéndose una nueva al final; el número de períodos firmes queda invariable, de forma que el carácter «rodante» del PMP no altere dicha condición de estabilidad. Algo que, por razones obvias, también debe conseguirse es que el mencionado Programa Maestro sea realista, es decir, evitar que, con objeto de asegurarse lo que desean en realidad, éste sea «inflado» por parte de los clientes, de otras plantas de la empresa o del propio Departamento Comercial. Si ello no se consigue estaremos trabajando con prioridades erróneas en los pedidos (ver Capítulo 9), fabricando cantidades que quizá sean parcialmente anuladas, programando indebidamente la capacidad necesaria de hombres y equipos, etc. En definitiva, hay que crear la concienciación adecuada en todos aquellos que, directa o indirectamente, influyan en la definición del Programa Maestro y, con él, en la Programación de Componentes y en la Ejecución.

El resultado final debe ser la obtención de un PMP realista que refleje las cantidades necesarias de cada producto final para cada período de tiempo (momento de entrega), de forma que se satisfaga el Plan Agregado de Producción y, con él, las necesidades fijadas en el Plan Estratégico. Cualquiera de las dos

[2] Como ya se comentó en el capítulo anterior, en entornos de planificación de la producción no informatizados, este horizonte se acorta considerablemente.

opciones de PMP definidas en el Apartado 3.8 (considerar las Necesidades Brutas o las Necesidades Netas de productos finales) puede servir de base para realizar la explosión de necesidades que nos llevará al Plan de Materiales. Por nuestra parte, en el ejemplo del Apartado 4.5, utilizaremos la primera de ellas.

Otro aspecto a tener en cuenta son los **componentes** para los que existe una **demanda directa** debido a que se venden como piezas de repuesto o para reparaciones. Aunque, en ese sentido, son auténticos productos finales, en entornos MRP no suelen incluirse en el PMP, sino que las correspondientes necesidades son introducidas directamente durante el proceso de explosión en el momento en que son computadas las derivadas de la demanda dependiente (ver ejemplo del Apartado 4.5).

Para terminar diremos que el PMP utilizado en el MRP originario no consideraba las limitaciones de capacidad, por lo que el Plan de Materiales resultante podría ser inviable. Para evitarlo se hizo necesario obtener, mediante técnicas externas, a partir del Programa Maestro mencionado, un PMP factible de acuerdo con el proceso indicado en el capítulo anterior (Apartado 3.10).

En cuanto a la forma de representación del PMP, la más común suele ser matricial, refiriéndose cada fila a un producto final (o a un subconjunto complejo en su caso) y cada columna a un cubo de tiempo (ver Tabla 4.4, Apartado 4.5). Dado que éstos son períodos discretos, de al menos una semana, habrá que indicar a qué parte del mismo hay que referir las cantidades en cuestión; en general, se adopta el criterio de que sea al principio, en medio o al final, pero, en cualquier caso, el mismo momento para todos los items que aparecerán en el proceso de explosión.

4.4.2. La Lista de Materiales LM (*Bill of Materials*)

Es una descripción clara y precisa de la estructura que caracteriza la obtención de un determinado producto (ver Figura 4.1), mostrando claramente:

- Los componentes que lo integran.
- Las cantidades necesarias de cada una de ellos para formar una unidad del producto en cuestión.
- La secuencia en que los distintos componentes se combinan para obtener el artículo final.

Aunque existen diversas formas de expresar la Lista de Materiales, la más clara, a nuestro juicio, es la de la estructura en forma de árbol con diferentes niveles de fabricación y montaje. La codificación por niveles facilita la explosión de las necesidades a partir del elemento final, y su lógica es la siguiente:

- Nivel 0: Los productos finales no usados, en general, como componentes de otros productos; es el nivel más complejo de la lista.
- Nivel 1: Los componentes unidos directamente a un elemento de nivel 0.
- Y, en general, en cada nivel i se situarán aquellos items en relación directa con otros de nivel $i-1$, siguiendo este proceso hasta llegar a las materias primas y partes compradas en el exterior.

Respecto de los elementos de nivel 0, hay que decir que no siempre se tratará de productos finales propiamente dichos. En el caso de múltiples productos finales, que son en realidad opciones de un número reducido de modelos (ver Apartado 4.4.1), se colocarán en el nivel 0 los subconjuntos complejos representativos de cada uno de éstos. Cuando se da este caso, las **Listas de Materiales** se denominan **modulares.**

Dado que, en principio, los distintos elementos van colocándose en el nivel siguiente al del conjunto del que forman parte, *puede ocurrir que un mismo ítem aparezca en más de un nivel*. Podemos encontrarnos con dos casos principales: que ello ocurra dentro de un mismo producto final (elemento B en la Figura 4.4*a*) o bien que el componente en cuestión sea común a más de un producto final (elemento B en la Figura 4.4*b*).

Como veremos en el apartado siguiente, la *explosión de necesidades se realiza nivel a nivel*, comenzando en el 0. Cuando un componente aparece en más de un nivel, sus necesidades totales no pueden calcularse hasta que se llegue al último nivel en que aparece. Desde el punto de vista informático, esto resulta ineficiente, por lo cual, cuando se dé este caso, *debe colocarse el elemento* en cuestión *en el nivel más bajo* de aquellos en que aparezca (ver Figura 4.5), lo cual facilita la realización de la explosión de necesidades por el ordenador, aumentando la eficiencia del proceso.

Con respecto a otras vías de representación de la Lista de Materiales, las Tablas 4.2*a* y 4.2*b* muestran dos posibles formas tabulares para la LM del

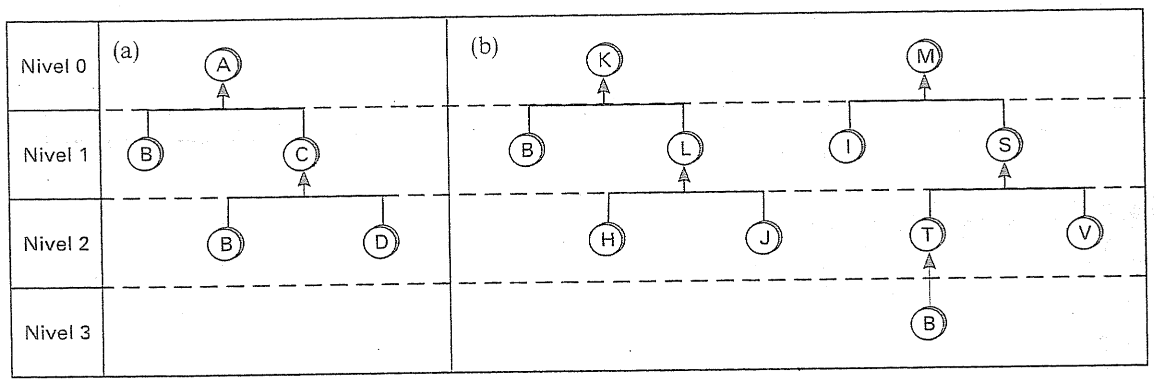


Figura 4.4. Elementos que aparecen en más de un nivel: (a) en un mismo producto; (b) en distintos productos.

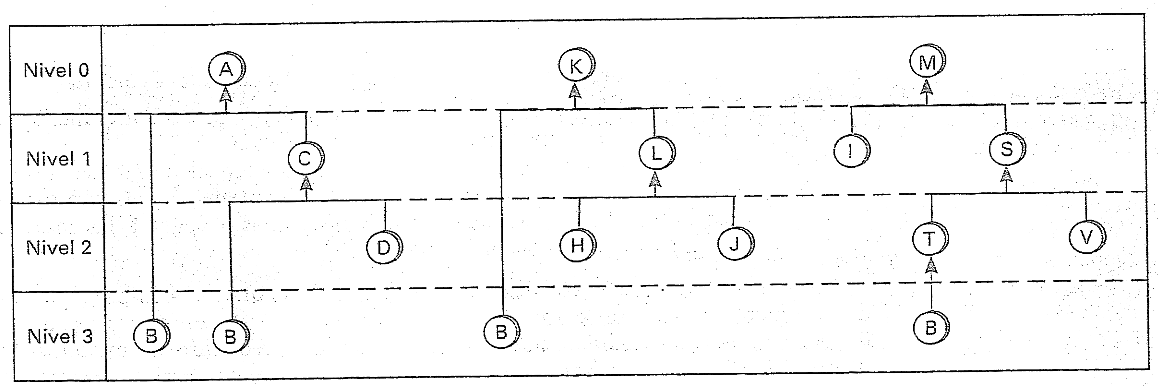


Figura 4.5. Elementos comunes codificados en el nivel inferior.

Tabla 4.2. Formas tabulares de la Lista de Materiales

4.2*a*:

A
- B(3)
  - D(2)
  - E(1)
- C(2)
  - G(3)
  - F(1)

4.2*b*:

Nivel	Item	Componentes
0	A	B(3) C(2)
1	B	D(2) E(1)
1	C	G(3) F(1)

ejemplo desarrollado en el Apartado 4.2. En la Tabla 4.2*a*, se reconoce el proceso de fabricación y montaje de una forma parecida, pero menos clara, a la del árbol de la Figura 4.1; este formato representa una forma primitiva de LM que se reveló como ineficiente desde el punto de vista informático. El formato tabular de 4.2*b*, en el que aparecen, ordenados por niveles, todos y cada uno de los items, junto con los componentes de los que proceden directamente, es mucho más eficiente y utilizado.

Es necesario recalcar la necesidad de que se disponga de *una sola lista de materiales por cada producto* y de que ésta sea una representación *fiel* de la forma de obtención del mismo. Frecuentemente, los nuevos productos son realizados bajo presión de tiempo y los dibujos y especificaciones pueden estar incompletos o/y contener errores; ello provoca posteriores correcciones por parte de Ingeniería. Igualmente puede ocurrir que se efectúen rediseños en los productos o/y en los procesos de producción. Esto muestra la importancia de mantener constantemente *actualizado el fichero de Listas de Materiales*. Aunque esto parezca obvio, no resulta evidente en la práctica, donde nos encontramos fácilmente con empresas que mantienen LM erróneas o incluso que utilizan distintas LM en Fabricación, Contabilidad de Costes, Ingeniería, etc.

4.4.3. El Fichero de Registros de Inventarios (*Inventory Records File*)

Es la fuente fundamental de información sobre inventarios para el MRP y contiene los tres segmentos siguientes para todos y cada uno de los items en stock.

a) *Segmento maestro de datos*, que contiene, básicamente, información necesaria para la programación, tal como identificación de los distintos items en forma numérica, tiempo de suministro, stock de seguridad en su caso, algoritmo para determinar el tamaño del lote de pedido, nivel más bajo en que aparece, posible porcentaje de defectuosos, etc. (ver Tabla 4.6*a*).

b) *Segmento de estado de inventarios*, que, en el caso más general, incluye, para los distintos períodos, información sobre:

- *Necesidades brutas*, o cantidad que hay que entregar de los items para satisfacer el pedido originado en el (los) nivel(es) superior(es), así como sus fechas de entrega.
- *Disponibilidades* en almacén de los distintos artículos.
- *Cantidades comprometidas* para elaborar pedidos planificados cuyo lanzamiento o emisión ya ha tenido lugar y que, por tanto, habrá que deducir de las disponibilidades para que no sean asignadas a pedidos posteriores.
- *Recepciones programadas*, en fecha y cantidad, de pedidos ya realizados.
- *Necesidades netas*, calculadas como diferencia entre las necesidades brutas y las disponibilidades más los pedidos pendientes, todo ello situado convenientemente en el tiempo.
- *Recepción de pedidos planificados*, es decir, los pedidos ya calculados del ítem en cuestión, así como sus respectivas fechas de recepción. Se calculan a partir de las necesidades netas, en base a algún método de determinación del tamaño del lote (ver Ejemplo 4.2 y Apartado 4.6.1).
- *Lanzamiento de pedidos planificados*. Su descripción, en cuanto a magnitud, es la indicada en el párrafo anterior; sin embargo, están asociados a las fechas de emisión de los correspondientes pedidos. Estas se calculan decalando hacia atrás la de recepción en un número de períodos igual al tiempo de suministro.

Es evidente la absoluta necesidad de conocer el estado de inventarios antes de emprender cualquier acción, guiándonos en las respuestas sobre ¿qué necesitamos?, ¿qué tenemos?, ¿qué pedimos? Conviene comentar que, dependiendo del tipo de sistema MRP, puede ocurrir que, si hay que mantener stock de seguridad (SS) éste se incluya o no dentro de la cifra de disponibilidades; en el primer caso, debe tenerse en cuenta que la parte correspondiente al stock de seguridad no está realmente disponible a efectos de programación. Por ello, en dicha fila aparecería como mínimo el SS. Nosotros utilizaremos esta variedad. La Tabla 4.3. muestra un ejemplo sencillo de cálculo donde intervienen los distintos elementos del estado de inventarios para un tiempo de suministro de dos períodos; los datos de partida están encerrados en círculos.

c) *Segmento de datos subsidiarios*, con información sobre órdenes especiales, cambios solicitados y otros aspectos.

Tabla 4.3. Cálculos para el segmento de estado de inventarios

Conceptos \ Período	1	2	3	4	5	6
Necesidades brutas		(40)		(60)		(80)
Disponibilidades	(60)	60	20	20	10	⊖ 10
Recepciones programadas				(50)		⊖
Necesidades netas						70
Recepción de pedidos planificados						⊕ 70
Lanzamiento de pedidos planificados				70	Ts=2	

Dada su evidente importancia en el proceso de planificación de las necesidades de materiales, resulta evidente que el *fichero de registro de inventarios* debe ser *mantenido al día*, de forma que en él se reflejen los distintos cambios ocurridos ya sea por transacciones internas (generadas por el sistema MRP) o externas (producidas fuera del sistema). Para una actualización adecuada de las disponibilidades reales existentes en almacén es conveniente introducir, como mínimo, el **recuento o inventario cíclico** en lugar del clásico inventario anual, aunque lo ideal sería mantener un control continuamente actualizado a través del empleo de códigos de barra para los distintos items (ver Capítulo 1, Apartado 1.4.3.2). Con dicho método, las existencias de los distintos items son verificadas continuamente por grupos, deduciendo los defectuosos, existiendo diversas modalidades para llevarlo a cabo (ver Vollman y otros, 1988, Capítulo 3). Los resultados son introducidos en el segmento de estado de inventarios diaria o semanalmente en función del tipo de sistema de replanificación empleado (ver Apartado 4.6.3.2).

4.5. DESARROLLO DEL METODO

Vamos a utilizar un ejemplo más completo que el del Apartado 4.2 con objeto de ilustrar de forma más detallada el proceso de cálculo en MRP.

EJEMPLO 4.2. Desarrollo de un caso básico de MRP

A. Entradas al sistema.

A1. Programa maestro de producción (PMP). Supondremos una empresa que fabrica dos productos, patines (*P*) y monopatines (*M*), vendiendo asimismo las ruedas como piezas de recambio. A efectos de simplificación, consideraremos sólo ocho períodos del horizonte de planificación a partir del momento actual y supondremos que, a partir de los pedidos de los clientes y de la previsión de ventas, la gerencia construye el PMP de la Tabla 4.4 en el que las cantidades son necesidades brutas y están referidas al final del correspondiente período.

Tabla 4.4. Programa maestro de producción

Productos \ Período	1	2	3	4	5	6	7	8
Patines (*P*)[3]		200			300		100	400
Monopatines (*M*)				200	100		200	

Como se indicó en el Apartado 4.4.1, las necesidades derivadas de la demanda externa de componentes, en este caso las ruedas, no va a aparecer en el PMP. Dicha información, que aparece en la Tabla 4.5, se almacena en el Fichero Registros de inventarios y será utilizada cuando se calculen las necesidades totales del ítem en cuestión (ver Tabla 4.9).

Tabla 4.5. Demanda externa de componentes

Componentes \ Período	1	2	3	4	5	6	7	8
Ruedas (*R*)				200		200		200

A2. Lista de materiales. La estructura de los distintos productos del PMP, en forma de árbol, es la indicada en la Figura 4.6, donde se han señalado los diferentes niveles.

[3] Las cantidades no se refieren a pares de patines, sino a unidades, que supondremos utilizables para pie derecho o izquierdo. Lógicamente, las cifras se han calculado multiplicando por dos el número de pares a fabricar.

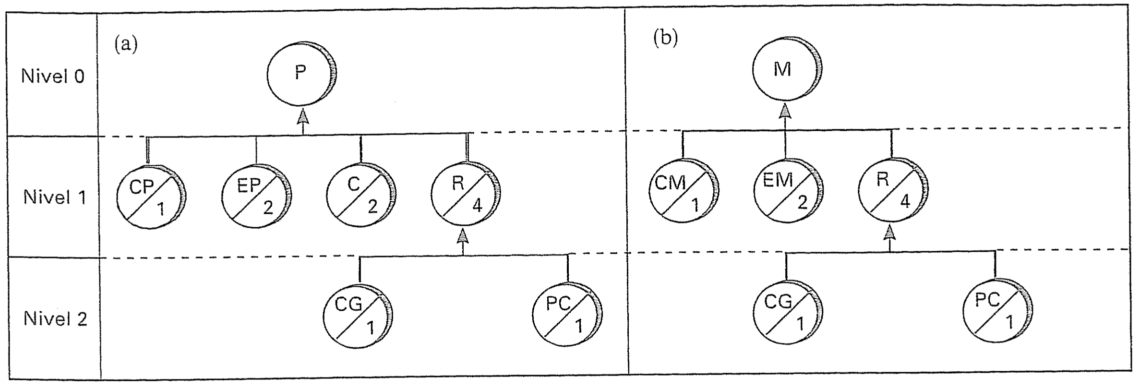


Figura 4.6. Lista de materiales del patín (a) y del monopatín (b).

A3. Fichero de Registros de Inventarios (RI). Los segmentos maestro de datos y de estado de inventarios al comienzo del horizonte de planificación aparecen, respectivamente, en las Tablas 4.6*a* y 4.6*b*. Hemos supuesto stock de seguridad para aquellos items sujetos a demanda independiente, cuya demanda está sujeta, por tanto, a aleatoriedad (ver Apartado 4.1). Por lo que respecta al método de cálculo del lote hemos tomado el más sencillo, que consiste en pedir exactamente las necesidades netas a cubrir en cada período. En el Apartado 4.6.1 veremos otras técnicas de dimensionado.

Tabla 4.6. Fichero de registros de inventario

4.6*a*: Segmento maestro de datos

Item \ Concepto	Identificación	Stock de seguridad	Método de cálculo del lote	Tiempo de suministro (semanas)
P	0140	20	lote a lote	2
M	0150	20	lote a lote	2
CP	1140	—	lote a lote	1
EP	2140	—	lote a lote	1
C	3140	—	lote a lote	1
R	1450	40	lote a lote	1
CM	1150	—	lote a lote	1
EM	2150	—	lote a lote	1
CG	11450	—	lote a lote	1
PC	21450	—	lote a lote	1

4.6*b*: Segmento de estado de inventarios

Item \ Concepto	Necesidades brutas	Disponibilidades	Recepciones programadas	Necesidades netas	Pedidos planificados	
					Recepción	Lanzamiento
P	—	100	150 en $t = 2$	—	—	—
M	—	80	—	—	—	—
CP	—	10	—	—	—	—
EP	—	—	—	—	—	—
C	—	—	—	—	—	—
R	—	90	—	—	—	—
CM	—	—	—	—	—	—
EM	—	—	—	—	—	—
CG	—	5	600 en $t=1$	—	—	—
PC	—	—	600 en $t=1$	—	—	—

B. Planificación de las necesidades de materiales.

El proceso comienza en la parte superior de las listas de materiales, calculando las necesidades netas y, a partir de ellas, los pedidos a realizar de los productos de nivel 0. La fórmula para determinar las *necesidades netas* de un período determinado cuando ha de mantenerse un stock de seguridad, es la siguiente:

$$\text{Necesidades netas (NN)} = \text{Necesidades brutas (NB)} - [\text{Disponibilidades (D)} - \text{stock de seguridad (SS)}] - \text{Recepciones Programadas (RP)} \quad [1]$$

Si al aplicar la fórmula [1] resulta una cantidad negativa, ello significa que podemos hacer frente a la demanda y que, por tanto, las necesidades netas correspondientes son nulas. De acuerdo con ello, obtenemos la Tabla 4.7 para los items de nivel 0. Las necesidades brutas de los items *P* y *M* proceden del programa maestro de producción, siendo datos del problema, así como el resto de las cifras encerradas en círculos.

Puede observarse cómo las necesidades netas del producto *P* en el período 2 son nulas ya que, de la aplicación de [1], resulta:

$$NN = 200 - [100 - 20] - 150 = -30 \Rightarrow NN = 0$$

A partir del tercer período, las *disponibilidades*, D, se reducen a 50 unidades ya que:

$$D(i + 1) = D(i) + RP(i) - NB(i) \quad [2]$$

y, para $i = 2 \Rightarrow D(3) = 100 + 150 - 200 = 50$

Las *necesidades netas de P en el período* 5 se calculan del siguiente modo:

$$NN(5) = NB(5) - D(5) + SS(5) - RP(5) = = 300 - 50 + 20 - 0 = 270$$

Tabla 4.7. Cálculo de necesidades netas de los items de nivel 0

Tamaño lote	Ts	Disponible	Comprometido	SS	Identificación Item	Código nivel inferior		1	2	3	4	5	6	7	8
LOTE A LOTE	2	100		20	P 0140	0	Necesidades brutas (NB)		(200)			(300)		(100)	(400)
							Disponibilidades (D) (100)	100	100	50	50	⊖ 50	20	⊖ 20	⊖ 20
							Recepciones programadas (RP)		(150)			(+SS)		(+SS)	(+SS)
							Necesidades netas (NN)					270		100	400
							Recepción pedidos planificados (RPPL)					270		100	400
							Lanzamiento pedidos planificados (PPL)			270		100	400		
LOTE A LOTE	2	80		20	P 0150	0	Necesidades brutas (NB)				(200)	(100)		(200)	
							Disponibilidades (D) (80)	80	80	80	⊖ 80	20	⊖ 20	⊖ 20	
							Recepciones programadas (RP)				(+SS)	(+SS)		(+SS)	
							Necesidades netas (NN)				140	100		200	
							Recepción pedidos planificados (RPPL)				140	100		200	
							Lanzamiento pedidos planificados (PPL)		140	100		200			

Con objeto de tener disponibles las cantidades indicadas por las distintas necesidades netas en el período correspondiente, será necesario que los pedidos derivados de estas últimas (iguales en este caso a las necesidades netas por emplear la técnica «lote a lote») se reciban en dichos períodos (fila de **recepción de pedidos planificados**) y se soliciten dos semanas antes, que es el tiempo de suministro para estos ítems de acuerdo con la información contenida en el segmento maestro de datos. Ello da lugar a la fila de **lanzamiento de pedidos planificados** de *P* y *M*. Así pues, estas dos últimas filas sólo se diferencian en el decalado temporal impuesto por el tiempo de suministro.

El proceso continúa pasando a la *explosión de las necesidades*, que no es más que el cálculo de las necesidades netas (y lanzamiento de pedidos planificados) para los distintos niveles. Ello se realiza nivel a nivel, partiendo de la parte superior de la lista de materiales hasta llegar a las materias primas y partes compradas en el exterior. Así pues, tras haber realizado los cálculos para el nivel 0, pasamos al nivel 1.

El *punto de partida* está constituido por los *artículos de nivel 0*. Para que se cumplan las fechas previstas en la programación realizada para éstos, los correspondientes *pedidos planificados deben generar, para el mismo período, las necesidades brutas de los ítems de nivel 1 que estén directamente relacionados con aquéllos en la lista de materiales*. Así, por ejemplo, las necesidades brutas del ítem EP (ejes del patín) serían las que aparecen en la Tabla 4.8. Lógicamente, es necesario multiplicar por 2 los PPL, pues, de acuerdo con la estructura indicada en el árbol de fabricación (LM), hay dos ejes en cada patín.

Tabla 4.8. Generación de las necesidades brutas de ejes de patines

Períodos	1	2	3	4	5	6	7	8
Lanzamiento pedidos planificados ítem P (PPL_P)			270		100	400		
			↓×2		↓×2	↓×2		
Necesidades brutas ítem EP (NB_{EP})			540		200	800		

A veces existen *componentes de un nivel utilizados por más de un ítem de nivel superior*, como ocurre, en nuestro caso, con las ruedas, *R*, que se emplean en los dos productos de la empresa. Además, en esta ocasión dicho componente está sujeto a demanda independiente como se indicó en la Tabla 4.5. El *cálculo de las necesidades brutas se efectúa aquí teniendo en cuenta*, en cada período, los lanzamiento de pedidos planificados de *los distintos ítems que utilizan el componente común*, a lo cual hay que *añadir*, cuando las haya, *las necesidades provocadas por la demanda independiente*. De acuerdo con ello, para *R* obtendríamos la Tabla 4.9, en la que se ha destacado con flechas el cálculo de NB_R en los períodos 3 y 6.

A partir de las necesidades brutas calculadas para los componentes de nivel 1, y operando como se hizo para el nivel 0 (ver Tabla 4.7), se determinan las correspondientes necesidades netas y pedidos planificados. Del mismo modo se continúa en los siguientes niveles hasta llegar al último de las distintas listas de materiales. En nuestro problema, ello nos lleva a la Tabla 4.10[4]. Conviene recordar que

Tabla 4.9. Cálculo de necesidades brutas de ruedas

Períodos	1	2	3	4	5	6	7	8
PPL_M		140	100		200			

(×4)

Períodos	1	2	3	4	5	6	7	8
PPL_P			270		100	400		

(×4)

Períodos	1	2	3	4	5	6	7	8
Demanda independiente R				200		200		200

(×1) (+)

Períodos	1	2	3	4	5	6	7	8
NB_R		560	1480	200	1200	1800		200

[4] En las filas 2 y 3 de esta tabla, correspondientes al PMP, sólo hemos reproducido los lanzamientos de pedidos planificados (PPL), pues los cálculos que llevaron a ellos fueron realizados en la Tabla 4.7.

Tabla 4.10. Proceso de explosión de necesidades

Tamaño lote	TS	Disponible	SS	Comprometido	Identificación ítem	Código nivel inferior	Conceptos \ Períodos	1	2	3	4	5	6	7	8
Lote a lote	2	100	20	0	P	0	PPL_P			270		100	400		
Lote a lote	2	80	20	0	M	0	PPL_M		140	100		200			
LOTE A LOTE	1	10	0	0	CP 1140	1	NB_{CP}			270		100	400		
							D_{CP} (10)	10	10	10	0	0	0		
							RP_{CP}		×2						
							NN_{CP}			260		100	400		
							$RPPL_{CP}$			260		100	400		
							PPL_{CP}		260		100	400			
LOTE A LOTE	1	0	0	0	EP 2140	1	NB_{EP}			540		200	800		
							D_{EP}	0	0	0	0	0	0		
							RP_{EP}								
							NN_{EP}			540		200	800		
							$RPPL_{EP}$			540		200	800		
							PPL_{EP}	×4	540		200	800			
LOTE A LOTE	1	0	0	0	C 3140	1	NB_C			540		200	800		
							D_C	0	0	0	0	0	0		
							RP_C			×4	×4		×4		
							NN_C			540		200	800		
							$RPPL_C$			540		200	800		
							PPL_C		540		200	800			
LOTE A LOTE	1	90	40	0	R 1450	1	NB_R		560	1480	200	1200	1800		200
							D_R (90)	90	90	40	40	40	40		40
							RP_R		+ss						
							NN_R		510	1480	200	1200	1800		200
							$RPPL_R$		510	1480	200	1200	1800		200
							PPL_R	510	1480	200	1200	1800		200	
LOTE A LOTE	1	0	0	0	CM 1150	1	NB_{CM}		140	100		200			
							D_{CM}								
							RP_{CM}								
							NN_{CH}		140	100		200			
							$RPPL_{CM}$		140	100		200			
							PPL_{CM}	140	100		200				
LOTE A LOTE	1	0	0	0	EM 2150	1	NB_{EM}		280	200		400			
							D_{EM}								
							RP_{EM} ×1	×1	×1	×1	×1		×1		
							NN_{EM}		280	200		400			
							$RPPL_{EM}$		280	200		400			
							PPL_{EM}	280	200		400				
LOTE A LOTE	1	5	0	0	CG 11450	2	NB_{CG}	510	1480	200	1200	1800		200	
							D_{CG} 5	5	95	0	0	0	0	0	
							RP_{CG}	(600)							
							NN_{CG}		1385	200	1200	1800		200	
							$RPPL_{CG}$		1385	200	1200	1800		200	
							PPL_{CG}	1385	200	1200	1800		200		
LOTE A LOTE	1	0	0	0	PC 21450	2	NB_{PC}	510	1480	200	1200	1800		200	
							D_{PC}		90	0	0	0	0	0	
							RP_{PC}	(600)							
							NN_R		1390	200	1200	1800		200	
							$RPPL_{PC}$		1390	200	1200	1800		200	
							PPL_{PC}	1390	200	1200	1800		200		

existe una excepción al cálculo de necesidades vía explosión nivel a nivel. Aquélla se produce para elementos de poco valor que se utilicen en grandes cantidades, los cuales son, por lo general, componentes de muchos items. En este caso suele ser más conveniente utilizar alguna de las técnicas clásicas de gestión de stocks.

Como puede apreciarse del ejemplo realizado, la información suministrada por el MRP hace de ella algo más que una técnica de gestión de inventarios, constituyendo simultáneamente un método de programación de la producción, pues no sólo indica cuándo deben emitirse los pedidos a los proveedores y en qué cuantía, sino también cuándo debe comenzar la fabricación o/y el montaje de los distintos lotes que deban producirse en la empresa. El resumen de esta información aparece en la Tabla 4.11.

Items \ Período	1	2	3	4	5	6	7	8
P			270		100	400		
M		140	100		200			
CP		260		100	400			
EP		540		200	800			
C		540		200	800			
R	510	1.480	200	1.200	1.800		200	
CM	140	100		200				
EM	280	200		400				
CG	1.385	200	1.200	1.800		200		
PC	1.390	200	1.200	1.800		200		

Tabla 4.11. Pedidos a fábrica y a proveedores

4.6. ALGUNOS FACTORES RELACIONADOS CON EL PROCESO DE PLANIFICACION DE NECESIDADES DE MATERIALES

En el presente apartado vamos a desarrollar más ampliamente algunas de las técnicas y conceptos que son necesarios para el desarrollo del MRP.

4.6.1. Técnicas de dimensionado del lote

En MRP, la respuesta a la pregunta ¿cuándo pedir? es de mayor importancia que la que responde a ¿cuánto? Sin embargo, ésta no es una cuestión nada desdeñable, especialmente cuando la solución elegida puede hacer variar de forma importante los costes de la gestión de inventarios. Las técnicas clásicas (ver Capítulo 13) de cantidad fija de pedido (CFP) y período fijo (PF), son fácilmente utilizables en MRP, pero lo cierto es que, dado el escaso cumplimiento de sus hipótesis, su eficiencia deja mucho que desear en un contexto de demanda dependiente y discreta. Ello ha estimulado la aparición de técnicas aproximadas que, aunque en general no son optimizadoras, suelen ser más adecuadas para el caso que aquí

tratamos. A continuación comentaremos brevemente algunas de las más empleadas para demanda discreta.

4.6.1.1. *Pedidos lote a lote*

Es la técnica más simple y consiste en hacer los pedidos iguales a las necesidades netas de cada período (ver Apartado 4.5), minimizando así los costes de posesión. Son variables tanto los pedidos como el intervalo de tiempo entre los mismos.

4.6.1.2. *Período constante*

Se fija el intervalo entre pedidos de forma intuitiva o empírica. Una vez establecido éste, los lotes se igualan a la suma de las necesidades netas en el intervalo elegido, resultando aquéllos, lógicamente, variables. En esta técnica y en las restantes, en la que los pedidos agrupan necesidades netas de varios períodos, los lotes deben hacerse llegar en el primero de los períodos computados.

EJEMPLO 4.3. Aplicación de la técnica de Período Constante

La Tabla 4.12 muestra la aplicación de esta técnica al caso de las ruedas del ejemplo del Apartado 4.5, suponiendo que se ha fijado un período constante igual a 2. Hay que hacer notar que, en el caso de los pedidos de 510 unidades y 200 unidades (que por el método normal de cálculo llegarían en un momento en el que no existen necesidades netas), el programador puede retrasar sus momentos de emisión y, con ello, el de recepción. Así pues, el primero de ellos podría solicitarse en el período 1 para que llegase al 2 y el segundo pedirse el 7 para recibirse el 8 (ver Apartado 4.7.1.2).

Períodos		1	2	3	4	5	6	7	8
NB_R			560	1480	200	1200	1800		200
D_R	(90)	90	90	40	40	40	40		40
RP_R									
NN_R			510	1480	200	1200	1800		200
$RPPL_R$		510 - - >		1680		3000		200 - - >	
PPL_R	510 - - >		1680		3000		200 - - >		

Tabla 4.12. Aplicación de la técnica de período constante (PC) para PC = 2

4.6.1.3. *POQ (Periodic Order Quantity)*

Es análogo al anterior, salvo que el valor del período constante se calcula a partir del lote económico obtenido por el método clásico (ver Capítulo 13); a partir de éste se deducen la frecuencia y el tiempo entre pedidos, el cual se toma como *período constante*. En el Ejemplo 4.4 aplicaremos esta técnica al caso de las ruedas, suponiendo un coste de emisión, Ce, de 1.500 um. por lote y un coste de posesión, Cp, de 1 um./un. y período. Por otra parte, la demanda se calculará como suma de las necesidades netas durante el horizonte de planificación, HP.

EJEMPLO 4.4. Aplicación de la técnica POQ

Sabemos que:

Ce = 1.500 u.m. Cp: 1 u.m./un. y período

HP = 8 períodos

$D = 510 + 1.480 + 200 + 1.200 + 1.800 + 200 = 5.390$ un.

Con estos datos podremos aplicar la fórmula del lote económico, Q, de la gestión de stock clásica (ver Capítulo 13), donde θ = HP:

$$Q = \sqrt{2\,Ce\,D/Cp\theta} =$$

$$= \sqrt{2 \times 1.500 \times 5.390/1 \times 8} = 1.421,7$$

Por tanto, para una demanda de 5.390, la frecuencia de pedidos será:

$$f = D/Q = 5.390/1.421,7 = 3,79 \approx 4 \text{ pedidos}$$

Ello implica que, si deseamos un intervalo constante, entre cada dos pedidos, éste sea igual a:

$$T = \theta/f = 8/4 = 2$$

el cual se utilizará de forma análoga a la indicada en el subapartado anterior.

Se llegaría al mismo resultado aplicando directamente la fórmula del tiempo óptimo entre pedidos de la gestión de stocks clásica (ver Capítulo 13).

4.6.1.4. *Mínimo coste unitario*

La decisión se basa en el coste unitario, entendiendo por tal la suma del coste de emisión y de posesión por unidad. Se comienza calculando este coste para el caso de pedir un lote igual a las necesidades netas del primer período. Se continúa para el caso de los dos primeros períodos, etc., seleccionando el lote que dé lugar al primer mínimo relativo. Se continúa del mismo modo con las necesidades netas aún no cubiertas hasta llegar al límite del horizonte de planificación (ver Ejemplo 4.5).

EJEMPLO 4.5. Aplicación de la técnica del mínimo coste unitario

Seguiremos trabajando con el caso de las ruedas, con los mismos datos utilizados en el apartado anterior. Se supondrá que las necesidades netas del primer período cubierto por el lote son consumidas a la llegada del mismo, no incurriéndose en costes de posesión.

∘ *Para* $Q = NN_{R2} = 510$ tenemos:

Cpu = Coste de posesión unitario = 0 (esto es debido a que se supone que el lote es consumido a su llegada).

$$Ceu = \text{Coste de emisión unitario} = \frac{Ce}{Q} = \frac{1.500}{510} = 2,94.$$

$$Cu = \text{Coste unitario} = Cpu + Ceu = 2,94$$

∘ *Para* $Q = NN_{R2} + NN_{R3} = 510 + 1.480 = 1.990$

Respecto al coste de posesión, ha de tenerse en cuenta que, del lote conjunto, 510 unidades son consumidas a la llegada del mismo, no incurriéndose en coste de posesión; el resto hasta 1990 (NN_{R3}) es almacenado un período hasta que son consumidas al comienzo del período 3.

$$Cpu = (0 + Cp \times NN_{R3} \times 1 \text{ período})/Q =$$
$$= 1 \times 1.480 \times 1/1.990 = 0,74$$

$$Ceu = Ce/Q = 1.500/1.990 = 0,75$$

$$Cu = 0,75 + 0,74 = 1,49$$

∘ *Para* $Q = NN_{R2} + NN_{R3} + NN_{R4} = 2.190$

Para calcular el Cpu hay que resaltar que, del lote en cuestión, 510 unidades no provocan costes de posesión, una cantidad equivalente a NN_{R3} (1.480) se almacenaría durante un período antes de su consumo y el resto, igual a NN_{R4} (200), permanecería inactivo durante dos períodos. De ese modo:

$$Cpu = 0 + (Cp \times NN_{R3} \times 1 \text{ período})/Q +$$
$$+ Cp \times NN_{R4} \times 2 \text{ períodos}/Q =$$
$$= (1 \times 1.480 \times 1 + 1 \times 200 \times 2)/2.190 = 0,85$$

$$Ceu = 1.500/2.190 = 0,68$$

$$Cu = 0,68 + 0,85 = 1,53$$

Dado que el coste unitario es mayor que el del lote ensayado anteriormente, este último es un mínimo relativo, por lo que se elige $Q = 1.990$, que cubrirá las necesidades netas de los dos primeros períodos. El segundo lote se calcula de la misma forma, comenzando con las necesidades de 4, que ya no están cubiertas por el pedido emitido anteriormente. Se continúa de forma iterativa hasta cubrir todo el horizonte de planificación. La Tabla 4.13 muestra un resumen de los cálculos realizados.

Tabla 4.13. Aplicación de la técnica del mínimo coste unitario

Período (i)	NN_{Ri}	Tamaño del lote acumulativo (Q)	Nº de semanas en que NN_{Ri} son almacenadas	Coste de posesión: Por lote (Cpi)	Coste de posesión: Por unidad (Cpi/Q)	Coste de emisión por unidad (Ce/Q)	Coste unitario
2	510	510	0	0	0	2,94	2,94
3	1480	(1990)	1 × C_p	1480	0,74	0,75	(1,49)
4	200	2190	2 × C_p	1880	0,85	0,68	1,53
4	200	200	0	0	0	7,5	7,5
5	1200	(1400)	1 × C_p	1200	0,85	1,07	(1,92)
6	1800	3200	2 × C_p	4800	1,5	0,46	1,96
6	1800	(1800)	0 × C_p	0	0	0,83	0,83
8	200	2000	2 × C_p	400	0,2	0,75	0,95
8	200	(2000)					

Esta técnica tiene el inconveniente de considerar un solo lote cada vez, y podría ocurrir que intercambios de necesidades netas entre lotes consecutivos diesen lugar a disminuciones apreciables del coste conjunto de dos o más lotes.

4.6.1.5. *Mínimo coste total*

Su hipótesis básica es que la suma total de costes de posesión y de emisión se minimizan cuando ambos son lo más parecido posibles, ante lo cual hay que decir que si bien esto es cierto para demandas continuas y bajo ciertas hipótesis (ver Capítulo 13), no tiene por qué cumplirse en el caso de demandas discretas. El Ejemplo 4.6 ilustra la técnica mencionada.

EJEMPLO 4.6. Aplicación de la técnica del mínimo coste total

La Tabla 4.14 muestra el cálculo del primer lote para el ítem *R* con datos iguales a los empleados en el apartado anterior. El cálculo del coste de posesión generado por los diferentes lotes se hace de forma idéntica.

Puede observarse que para un $Q = 1.990$, solicitado en el período 2, los costes de posesión por él generados son los más parecidos a los de emisión, pues, a partir de él, las diferencias entre ambos se van haciendo mayores. Así pues, éste es el primer lote elegido. Los demás lotes se calculan comenzando por las primeras necesidades no cubiertas (período 4), al igual que se hizo en el apartado precedente.

Tabla 4.14. Aplicación de la técnica del mínimo coste total

Período	NN_{Ri}	Lote acumulativo	N.º de semanas en que NN_{Ri} son almacenadas	Coste de posesión generado por lote	Coste de emisión
2	510	510	0	0	1.500
3	1.480	(1.990)	1	1.480 ≅	1.500
4	200	2.190	2	1.880	1.500

4.6.1.6. *El método Silver-Meal*

Con esta técnica se selecciona aquel lote que da lugar al mínimo coste total (emisión + posesión) por período para el intervalo cubierto por el reaprovisionamiento (Silver y Meal, 1978). Los distintos lotes que hay que considerar se obtienen de forma similar a la empleada anteriormente y los costes de posesión que de ellos se derivan se determinan análogamente. Lógicamente, el coste total por período (CTP) vendrá dado por:

$$CTP = \frac{\text{Coste de emisión} + \text{Coste de posesión}}{\text{Número de períodos cubiertos por } Q}$$

El Ejemplo 4.7 muestra la selección del primer lote por el método Silver-Meal para el ejemplo que venimos tratando.

EJEMPLO 4.7. Aplicación de la técnica Silver-Meal

En el presente caso, se elige como primer lote Q = = 2.190 (ver Tabla 4.15), no coincidente con el obtenido mediante las dos técnicas anteriores. Es posible que el mínimo aquí obtenido no sea absoluto, pero la práctica muestra que, en general, la búsqueda de un mínimo mejor que el primero encontrado implica un esfuerzo no justificado.

Tabla 4.15. Aplicación de la técnica Silver-Meal

Período	NN_{Ri}	Lote acumulativo	N.° de semanas en que NN_{Ri} son almacenadas	Coste de posesión generado por lote	Coste de emisión	Coste total por período
2	510	510	0	0	1.500	1.500
3	1.480	1.990	1	1.480	1.500	1.490
4	200	(2.190)	2	1.880	1.500	(1.126,6)
5	1.200	3.390	3	5.480	1.500	1.745

4.6.1.7. *Ratio coste de emisión/coste de posesión* (Part-period balancing)

Aunque no entraremos en el desarrollo de esta técnica[5], su idea básica es la misma que la del mínimo coste total, buscándose un lote con el que se iguala al máximo el coste de emisión y el de posesión. Se diferencian en que, para facilitar la comparación, se utilizan las «unidades-período» (UP), es decir, el producto del número de unidades por el período en que permanecen en almacén. Para el coste de posesión, el número de UP se calcula como en los ejemplos de los apartados anteriores, en los que, para conformar distintos posibles lotes, se iban acumulando necesidades netas que se almacenaban durante 0, 1, 2, etc., períodos. Por lo

[5] Ver, por ejemplo, Dilworth (1993, págs. 279-280).

que respecta al coste de emisión, las correspondientes UP se determinan dividiéndolo por el coste unitario de posesión. Se elige aquel lote que hace las UP del coste de emisión y del de posesión lo más parecidas posibles.

Existe una variante más sofisticada de este método que requiere un mayor tiempo de computación. Fue desarrollada por J. de Matteis y A. C. Mendoza (1968) y puede verse también en la obra de Orlicky (1975, págs. 129 y ss.).

4.6.1.8. *El algoritmo de Wagner-Whitin*

Los mencionados autores desarrollan , en un ya clásico artículo (1958), el algoritmo que lleva su nombre. Basándose en la programación dinámica, y para una serie de condiciones, seleccionan un conjunto de costes que aseguran la minimización de los costes totales de gestión (emisión + posesión) durante el horizonte de planificación. A pesar de su carácter optimizador, esta técnica ha recibido poca aceptación en la práctica debido principalmente a (Peterson y Silver, 1979, pág. 316):

— Su complejidad, que dificulta su comprensión en la práctica.
— El enorme esfuerzo computacional, muy superior al necesario para cualquiera de las técnicas heurísticas discutidas anteriormente. Este trae consigo un coste excesivo que no queda, en general, justificado (ver Apartado 4.6.1.9).
— Algunas de sus hipótesis.
— Las ventajas económicas derivadas de su utilización no suelen justificar su empleo (Silver y Meal, 1973).

4.6.1.9. *Lote económico (EOQ)*

Esta técnica, propia de la gestión de stocks de items con demanda independiente, puede también ser empleada en algunos casos. La fórmula de cálculo del lote aparece en el Apartado 4.6.1.3 y se desarrolla en el Capítulo 13. En caso de aplicarla, hay que tener en cuenta que para obtener la demanda a emplear, deberán tomarse como datos las necesidades netas del horizonte de planificación y no los datos históricos de inventarios, como hacen algunos paquetes de *software*. En caso contrario, se perdería la filosofía prospectiva de los sistemas MRP.

4.6.1.10. *Elección de una técnica de dimensionado del lote*

En principio podemos considerar tres posibilidades principales:

— Escoger una técnica clásica de gestión de stocks.
— Escoger una técnica heurística.
— Escoger una técnica de optimización (algoritmo Wagner-Whitin).

Un primer paso a dar podría ser deducir el grado de continuidad de la demanda y, a partir de dicha información, decidirnos por un método clásico (primera posibilidad) o por uno discreto (dos últimas posibilidades). Ello podría hacerse mediante el cálculo del **coeficiente de variabilidad, CV**, definido como el cociente entre la varianza de la demanda por período y el cuadrado de la demanda media por período (Peterson y Silver, 1973, pág. 323 y ss.), cuyo desarrollo lleva a:

$$CV = N \times \sum_{i=1}^{N} (D(i))^2 \Big/ \left(\sum_{i=1}^{N} D(i) \right)^2$$

donde N es el número de períodos en los que se dispone de previsiones de demanda (aquí necesidades netas) y $D(i)$ la demanda prevista en el período i.

Si el valor de CV fuese menor que 0,25, se supondría que se cumplen aproximadamente las hipótesis de la gestión de stocks clásica y podrían aplicarse algunas de sus técnicas (ver Capítulo 13). En caso contrario, CV $\geqslant$ 0,25, la demanda se consideraría discreta y se recurriría a técnicas heurísticas o a la optimización. El uso de esta última no parece estar justificado en la práctica; en cuanto a las técnicas heurísticas, es una opinión generalizada que todas ellas son imperfectas y que su bondad relativa depende de los valores de los parámetros empleados, fundamentalmente las necesidades netas y los costes de emisión y de posesión. Ello lleva a afirmar que no existe una «mejor» técnica de dimensionamiento del lote.

Algunos criterios que pueden ser utilizados como guía son[6]:

- — Seleccionar la técnica que origine lotes que den lugar a la mejor nivelación de cargas en los centros de trabajo y, en consecuencia, el coste más bajo de ajuste de capacidad. Según diversos estudios (ver nota 6), las que dan mejor resultado en este caso son las de Lote a Lote y la de Cantidad Constante.
- — Seleccionar aquella que genere menor inestabilidad en el Sistema y, por tanto, mayor realismo en los resultados de la planificación. La de Silver-Meal parece dar buenos resultados en este punto.
- — Seleccionar la que dé lugar a menores costes. En ese sentido, pueden usarse la de mínimo coste total o la de mínimo coste unitario.

Cualquiera que sea la técnica elegida, sí conviene tener en cuenta las posibles repercusiones que pueden derivarse cuando los distintos lotes agrupan necesidades netas de varios períodos. Como ejemplo, podemos citar la generación de prioridades erróneas (pues se mezclan necesidades con distinto nivel de urgencia) o que lotes mayores saturan más fácilmente en períodos concretos a los centros de trabajo. Está claro que el abanico de posibilidades es muy amplio y que el criterio debe marcarlo el planificador. En última instancia, siempre cabe la posibilidad de probar diversas técnicas hasta lograr determinar aquélla que resulte más satisfactoria desde el punto de vista de los objetivos del responsable de la planificación. En cualquier caso, la elección de un método determinado no parece ser una decisión que afecte de forma transcendental el éxito o fracaso de los Sistemas MRP.

4.6.1.11. *Ajustes en el tamaño del lote*

Los lotes calculados por medio de las distintas técnicas suelen ser objeto de algunos ajustes en función de consideraciones prácticas, entre ellos:

- *Mínimos y máximos.* Consisten en establecer límites inferiores o/y superiores a los lotes solicitados. Con ello puede evitarse, por ejemplo, la obsolescencia derivada de un pedido excesivamente alto o el procesamiento de lotes demasiado pequeños. Pueden expresarse en cantidades o en períodos por cubrir.
- *Factor de defectuosas.* Pretende prever la existencia de componentes defectuosos en un lote mediante la adición al lote calculado de un porcentaje adecuado, correspondiente a las defectuosas. Así, si llamamos LA al lote ampliado con la cantidad necesaria para hacer frente al tanto por uno de defectuosas, TUD, y L al lote realmente deseado, podemos escribir:

$$\text{LA} - \text{TUD} \times \text{LA} = \text{L} \Rightarrow \text{LA}\,(1 - \text{TUD}) = \text{L} \Rightarrow \text{LA} = \text{L} / (1 - \text{TUD})$$

de donde, a partir de los pedidos calculados por las distintas técnicas y de los tantos por uno de defectuosas, podremos calcular los pedidos que se deben solicitar para satisfacer realmente las necesidades. El valor de este parámetro no debe considerarse estático, sino que debe ser puesto al día en la medida en que vaya cambiando a lo largo del tiempo.
- *Múltiplos.* A veces, necesidades de proceso, de empaquetado, de coste, etc., hacen que los lotes deban ser múltiplos de algún número. Ello se tiene en cuenta redondeando el lote obtenido hasta el múltiplo inmediatamente superior.

[6] Ver los estudios de Silver-Meal (1973), Wagner-Within (1958) y Askin-Raghavinn (1983).

Lógicamente, estos ajustes pueden dar lugar a excesos de stocks que podrán ser utilizados para satisfacer necesidades futuras.

4.6.2. Utilización de stocks de seguridad (SS)

La mayor parte de las publicaciones que abordan la conveniencia del mantenimiento de stock de seguridad en los sistemas MRP, se inclinan por utilizarlo fundamentalmente a nivel de los productos finales y de los componentes cuya demanda es parcialmente independiente (por ejemplo, piezas de repuesto), que son los realmente sujetos a un consumo aleatorio. Por el contrario, cuando se trata de elementos sometidos únicamente a demanda dependiente, se considera como un concepto a revisar a la luz de la existencia de tiempos de suministro flexibles, de la posibilidad de revisión de prioridades y de la reprogramación en la emisión de pedidos, cualidades que tienden a disminuir la necesidad de inventario de seguridad, al que consideran un stock inactivo que debe intentarse eliminar. Dichos autores admiten la excepción en aquellos items sujetos a un tiempo de suministro errático, lo cual es más frecuente en los artículos comprados en el exterior.

Si bien es claro que el stock de seguridad puede reducirse en gran medida para los items con demanda dependiente, no es evidente que pueda llegar a ser eliminado en todos ellos sin provocar riesgo de ruptura, piénsese, por ejemplo, en posibles variaciones en el porcentaje de defectuosos, absentismo laboral, averías de maquinaria, etc. Sin embargo, *éstas y otras causas pueden ser reducidas al máximo con una adecuada gestión*, disminuyendo con ello el tamaño del SS necesario para hacerles frente. Así pues, la determinación de su magnitud constituye, aún hoy, una de las vías interesantes de investigación en el campo del MRP. No existen técnicas sofisticadas que garanticen el nivel de servicio deseado; suelen ser, por el contrario, reglas más o menos intuitivas, que se van ajustando a la vista de los resultados reales. Para Smith (1982) deben darse dos condiciones si queremos prescindir del stock de seguridad:

- Que el Programa Maestro de Producción, o al menos una parte significativa del mismo, se mantenga firme durante el horizonte de planificación.
- Que el riesgo en los tiempos de suministros y en los lotes por entregar sean despreciables.

No es fácil que se dé la primera condición durante todo el horizonte de planificación cuando éste es largo, pues ello suele provocar presiones del departamento comercial para variar el Programa Maestro de acuerdo con las cambiantes condiciones del mercado. Tampoco es obvio que se cumpla lo segundo en la mayor parte de los casos. Así pues, aunque hay que intentar evitarlo, para gran número de items será conveniente mantener un cierto stock de seguridad, de forma que se disminuya el riesgo de ruptura en la fabricación o/y montaje a causa

de la falta de materiales. Los tres métodos más usados para paliar en lo posible el peligro mencionado son:

- Mantener cantidades fijas.
- Incrementar los tiempos de suministros con un tiempo de seguridad.
- Aumentar las necesidades previstas.

La primera de las formas suele ser más conveniente cuando el riesgo radica principalmente en las cantidades, mientras que la segunda lo es cuando radica en el tiempo de suministro. En cuanto a la última, algunos prefieren incrementarla sólo en el producto final, mientras que otros defienden el hacerlo sobre los componentes en función del riesgo particular de cada uno de ellos.

Una alternativa interesante al SS es la de mantener un cierto volumen de **capacidad de seguridad**, lo cual no está muy extendido en la industria. Ello es debido a una concepción, errónea en muchos casos, según la cual se consideran los stocks como un activo y la utilización de la capacidad al 100 por 100 como un objetivo deseado (ver Capítulo 8).

Con objeto de reducir al mínimo el uso de stock de seguridad en los componentes, podemos tener en cuenta algunas consideraciones, las cuales fueron enunciadas en el primer párrafo del presente apartado:

- Las variaciones en el PMP, provocadas por cambios en las necesidades de productos finales pueden alterar las de componentes y hacer pensar en la conveniencia de mantener stock de seguridad en estos últimos. Sin embargo, la reprogramación del MRP alterará convenientemente el programa de pedidos y dichos cambios se conocerán con antelación. Así pues, en muchas ocasiones podrán tomarse a tiempo medidas correctoras que absorberían los cambios sin necesidad de mantener el SS.
- Si los problemas de aleatoriedad surgen por variaciones en los tiempos de suministro, una conveniente reordenación de prioridades en la elaboración de los pedidos (ver Capítulo 9) podría permitir alterar las fechas de comienzo de los distintos items y, con ello, no hacer necesario SS.
- Las técnicas de dimensionamiento del lote que agrupan necesidades pueden disminuir el tamaño del SS, pues, en caso de urgencia inesperada, podrán ser utilizadas partes del lote correspondiente a las necesidades más lejanas en el tiempo.
- Del mismo modo, los ajustes por exceso en los tamaños del lote (Apartado 4.6.1.11) generan un sobrante, utilizable en períodos posteriores a la recepción del pedido.
- Los SS de los productos finales pueden absorber las fluctuaciones provocadas por retrasos en la entrega de productos finales. La reposición del nivel deseado de stock de seguridad se produciría con la llegada del lote que ha sufrido el retraso.

Para terminar diremos que *si deseamos realmente reducir al mínimo el SS* deberemos concienciarnos de que el único camino es *identificar las causas que provocan su necesidad y eliminarlas o, al menos, reducirlas.*

4.6.3. Actualización de la planificación. Reprogramación en MRP

Resulta evidente que cualquier factor que altere alguna de las entradas al sistema mencionadas en el Apartado 4.4, es decir, el Programa Maestro de Producción, la Lista de Materiales y el Fichero de Registros de Inventarios, afectará al cálculo de necesidades y a la programación de pedidos; por ello, dichas entradas deberán ponerse continuamente al día con objeto de mantener la validez de los resultados obtenidos. De entre las distintas posibilidades que pueden presentarse vamos a comentar seguidamente algunas de ellas.

4.6.3.1. *Algunos factores que influyen en el cálculo de necesidades y programación de pedidos*

- *Cambios en la lista de materiales* (LM). Estos suelen proceder fundamentalmente de alteraciones introducidas por Ingeniería en los componentes de los productos o en la forma de obtenerlos, las cuales deberán reflejarse inmediatamente en la LM utilizada en el MRP.
- *Técnicas de cálculo del lote de pedido.* Como hemos podido observar en el Apartado 4.6.1, el valor de los pedidos planificados y, por tanto, las necesidades brutas de los items de niveles dependientes son función de la técnica empleada para el cálculo del lote.
- *Valor de los tiempos de suministro,* de los cuales depende el decalado temporal que da lugar a la programación resultante en el MRP. El tiempo de suministro, como ya sabemos, es el período que transcurre desde que se emite un pedido hasta que éste es recibido y está dispuesto para su utilización; su determinación suele proceder de datos empíricos o/y de opiniones de expertos, inflándose a veces con un tiempo de seguridad para tener en cuenta posibles retrasos en la entrega. No deben considerarse los tiempos de suministro como algo inalterable, sino que éstos pueden sufrir modificaciones por distintas circunstancias (por ejemplo, cambios de proveedores, averías de máquinas, cambios derivados de las prioridades como los indicados al final de este subapartado, etc.).
- *Uso común de componentes por más de un ítem* (comentado en los Apartados 4.4.2 y 4.5), aspecto que puede alterarse a lo largo del tiempo.
- *Pertenencia de un elemento a más de un nivel* (comentado en el Apartado 4.4.2).
- *Cambios en el Programa Maestro de Producción (PMP).* Los resultados obtenidos en la planificación de necesidades a partir de un cierto PMP seguirán siendo válidos si aquél no varía; en caso contrario deberán realizarse de nuevo los cálculos.
- *Prioridades,* las cuales derivan del Programa Maestro de Producción. La prioridad real de un pedido suele depender de otros items, existiendo básicamente dos tipos de dependencia:
  - *Vertical,* cuando depende de un elemento de nivel superior; por ejemplo, si se solicita un lote de componentes de un conjunto de nivel superior y la demanda de éste cambia, en cantidad o en fecha, también cambiará la prioridad del lote de componentes.
  - *Horizontal,* cuando depende de un elemento del mismo nivel. Ello quiere decir que un determinado componente no es realmente necesitado en un determinado momento si en ese instante no va a estar disponible otro componente del mismo conjunto; cuando eso ocurra se alterará la prioridad del primero. Tanto en este caso como en el anterior, el cambio en la prioridad puede traducirse, si así se desea, en un cambio en la programación.

De lo anterior puede deducirse que los sistemas MRP se salen de la lógica tradicional de programación, que sólo se preocupa de acelerar los pedidos retra-

sados, pero no suele ocuparse de retrasar o reducir la prioridad de aquellos items cuya entrega se ha vuelto menos urgente. En MRP se tienen en cuenta ambas situaciones.

4.6.3.2. *Sistemas de reprogramación en MRP*

Los sistemas comercializados de MRP pueden tener en cuenta los factores mencionados y remodelar la programación de acuerdo con los cambios producidos. Existen dos sistemas principales de puesta al día y reprogramación.

- *Sistema MRP regenerativo*

Es el enfoque tradicional, el más antiguo. Con este sistema se repite cada vez el cálculo completo, realizándose de nuevo la explosión de necesidades nivel a nivel para todos los productos finales del Programa Maestro de Producción; antes han de introducirse los cambios acaecidos desde el último programa. La salida generada por este procedimiento es muy voluminosa y el tiempo necesario para obtenerla suele ser muy largo, dado el elevado número de operaciones a realizar. Debido a ello, en los sistemas instalados en la industria, el ciclo típico de replanificación es de una a dos semanas, durante las cuales no pueden ser introducidos los posibles cambios que hayan tenido lugar durante las mismas. En la actualización se elimina del PMP la semana que ha transcurrido desde la última replanificación y se añade una nueva al final del PMP; de esa forma se mantiene la longitud del horizonte de planificación.

- *Sistema MRP de cambio neto*

Es un método más moderno. En lugar de realizar explosiones periódicas completas se llevan a cabo explosiones parciales, las cuales se limitan a aquellos items que hayan sufrido algún cambio susceptible de alterar las necesidades calculadas previamente. El procesamiento de datos es, por tanto, mucho menor que en el caso anterior y puede realizarse cada vez que ocurra algún cambio de importancia, con lo cual la puesta al día es más ágil y rápida. Hay que evitar, sin embargo, que ello lleve a excesivas y frecuentes alteraciones en las acciones que hay que realizar, pues ello provocaría excesiva inestabilidad; por ello, es conveniente establecer zonas de tolerancia de forma que sólo provoquen el reprocesamiento aquellos cambios que se salgan de ellas.

El sistema regenerativo es más adecuado en entornos estables, mientras que el de cambio neto será preferible cuando existan frecuentes cambios. En algunos casos podrían utilizarse de forma complementaria.

4.6.3.3. *El uso de pedidos planificados firmes (PPF)*

Como hemos visto, en MRP los pedidos planificados son controlados exclusivamente por el Sistema, el cual los genera y los va modificando con la reprogramación. Sin embargo, existe la posibilidad de «congelar» un pedido planificado en una fecha concreta, de forma que se quede «fijo», es decir, que no cambie en sucesivas replanificaciones. También cabe introducir un pedido concreto en un período modificando la planificación de MRP.

Esta opción, denominada **pedidos planificados firmes**, puede ser muy conveniente en ciertas circunstancias, como por ejemplo:

- Retrasar la fecha de emisión de un pedido. Esto puede ocurrir, por ejemplo, cuando se sepa que el tiempo de suministro se va a acortar, cuando el lote vaya a llegar en un período en el que no hay necesidades netas y, por tanto, pueda retrasarse (ver el caso de las ruedas en el Apartado 4.6.1.2), cuando se sabe que no habrá capacidad disponible, etc.
- Adelantar la fecha de emisión de un pedido. Por ejemplo: si se sabe que su TS se va a alargar, si se detecta una previsible ruptura que puede evitarse haciendo llegar antes un pedido planificado, etc.
- Fijar un pedido más pequeño del que MRP establece con el método de cálculo del lote, de forma que esté acabado antes si es urgente. A título de ejemplo, imagínese que en el Ejemplo 4.7 (Apartado 4.6.1.6) las necesidades netas del período 2 (=510) son urgentes y que el lote establecido (=2.190) puede retrasarse porque, debido a su tamaño, no se garantiza su finalización en el tiempo previsto. En ese caso, podríamos descomponerlo en dos lotes más pequeños (510 y 1.680) de forma que se acelerase la obtención de las necesidades netas del período 2.
- Aumentar el volumen de algún pedido para lograr incrementar el inventario ante posibles situaciones irregulares no previstas inicialmente.

Esta técnica flexibiliza la utilización de MRP y permite corregir los problemas que puedan derivarse de posibles circunstancias extraordinarias.

4.6.3.4. *El escalonamiento de las necesidades*

Es otra técnica que puede resultar de gran interés. Consiste en tener información sobre cómo se enlazan las necesidades de cada ítem con las fuentes que las provocan, o lo que es igual, con los items de niveles superiores que las han generado. Para ello, se realiza el proceso inverso a la explosión de necesidades, siguiendo la Lista de Materiales, y proporcionando el ordenador el encadenamiento de necesidades y pedidos, se va desde el nivel en que esté situado el componente de que se trate, al pedido de nivel 0 que lo originó. Si tomamos como ejemplo el pedido planificado de ruedas del período 2 (=1.480) de la Tabla 4.10 (Ejemplo 4.2), veríamos que procede de las necesidades brutas de ruedas del período 3. Estas, a su vez, se han generado a partir de los pedidos planificados de monopatines (=100) y patines (=270) del período 3, los cuales proceden, respectivamente, de las necesidades brutas de monopatines (=100) y patines (=300), que aparecían en el período 5 en el Programa Maestro de Producción.

Esta es precisamente la *principal aplicación de esta técnica: facilitar la retroalimentación de información desde el Plan de Pedidos de MRP a las necesidades del PMP*. Con ello pueden verse, por ejemplo, los efectos que posibles retrasos o modificaciones de los pedidos de componentes pueden provocar en el PMP. Se intentará, en un principio, no tener que alterarlo, lo cual puede conseguirse modificando los tiempos de suministro de pedidos situados en niveles comprendidos entre aquel que genere el problema y el PMP, o bien, actuando sobre las cantidades con *pedidos firmes*. En el ejemplo de las ruedas, un retraso del pedido mencionado traería consigo el de la entrega de las correspondientes cantidades del Programa Maestro. Ello podría evitarse si el tiempo de montaje de los 100 monopatines y 270 patines se acortase lo suficiente gracias a la aplicación de medidas transitorias de ajuste de capacidad (horas extras, subcontratación, etc.).

Además de lo anterior, esta técnica:

- Permite mejorar la comunicación de la empresa con sus proveedores, a los que puede tener informados de dónde, cómo y cuándo se van a usar los materiales que suministre.

- Es útil en la relación de la empresa con sus clientes, a los cuales puede hacer partícipes de los problemas mencionados y hacer que, en su caso, colaboren en la solución de los mismos (por ejemplo, puede que no tengan inconveniente en aceptar el retraso puntual de un pedido).

El inconveniente fundamental de esta técnica es la dificultad de su aplicación cuando las necesidades de componentes son generadas por múltiples items de nivel superior (por ejemplo, elementos que figuran en múltiples listas de materiales). En este caso se originan largos tiempos de cálculo y se hace necesario mantener una amplia capacidad adicional de registros. La información necesaria para realizar el escalonamiento puede guardarse en el Fichero de Registro de Inventarios o bien almacenarse por separado.

4.7. SALIDAS DEL SISTEMA MRP ORIGINARIO[7]

Los *outputs* del sistema MRP forman un abanico muy amplio y variado, presentándose además en distintos formatos, ya sean informes o mensajes individuales visualizados en las pantalla de los ordenadores o listados obtenidos a través de las impresoras. Todo este conjunto de salidas puede agruparse en salidas primarias y salidas secundarias, que pasamos a describir a continuación.

4.7.1. Salidas primarias del sistema MRP

Se trata del conjunto de informes básicos relativos a necesidades y pedidos a realizar de los diferentes items para hacer frente al Programa Maestro de Producción, así como a las acciones que hay que emprender para conseguirlo. Constituyen la salida fundamental de todo sistema MRP y se pueden concretar en el Plan de Materiales y en los Informes de Acción.

4.7.1.1. *El Plan de Materiales*

El Plan de Materiales (compras y fabricación denominado también Informe de Pedidos Planificados o Plan de Pedidos, es una salida fundamental del sistema MRP, pues contiene los pedidos planificados de todos los items, tal como vimos en el Ejemplo 4.2 (Tabla 4.11). Por regla general, los sistemas MRP suelen tener dos maneras de presentar esta información: **modalidad de Cubos de Tiempos** (*The time-bucket Approach*) y **modalidad de Fecha/Cantidad** (*The Date/Quantity Approach*). En ambos casos, aparecen en la cabecera los datos descriptivos e identificativos y los factores de planificación de los distintos items, al objeto de facilitar la labor del planificador de materiales. En cuanto a la información sobre los pedidos, la primera modalidad la presenta de forma matricial, de forma análoga a la que aparecía en la Tabla 4.11 (ver Tabla 4.16*a*). En cambio, el formato de fecha/cantidad es vertical, por orden de fecha; cada fila, que corresponde a un día laborable dentro de un período, refleja la cantidad correspondiente a un concepto determinado: necesidades brutas, lanzamiento de pedidos planificados, etc. Este segundo formato asocia los datos a la fecha del día que les corresponda dentro del período, de ahí que suministre al usuario una información mucho más precisa que el primer formato (ver Tabla 4.16*b*). Los sistemas MRP que utilizan esta

[7] Basado fundamentalmente en Luna, P., y García, S. (1990).

Tabla 4.16. Formato del Plan de Materiales

a: Modalidad de cubos de tiempo

Descripción ítem .... Bomba 21 Clase inventario: A
Código identificativo 21253
Tiempo suministro .... 2 semanas Cantidad asignada: 0
Stock seguridad 0
Algoritmo tamaño lote .... Lote a lote

Semanas		23	24	25	26	27
Necesidades brutas		50	0	100	60	10
Recepciones programadas				150		
Disponibilidades	50	50	0	0	50	0
Necesidades netas					10	10
Recepción pedidos planificados					10	10
Lanzamiento pedidos planificados			10	10		

b: Modalidad de fechas/cantidad

Descripción ítem ...... Bomba 21 Clase inventario: A
Código identificativo ... 21253
Tiempo suministro .... 2 semanas Cantidad asignada: 0
Stock seguridad 0
Algoritmo lote .... Lote a lote

Semana	Día laboral	Tipo de dato	Cantidad	Disponible
23	123	—	—	50
23	124	NB	30	20
23	126	NB	20	0
24	129	PPL	10	0
25	132	RP	150	150
25	133	NB	60	90
25	134	NB	40	50
25	135	PPL	10	50
26	137	RPPL	10	60
26	138	NB	40	20
26	139	NB	20	0
27	142	RPPL	10	10
27	143	NB	10	0

NB = Necesidades Brutas;
PPL = Lanzamiento pedidos planificados;
RPPL = Recepción de Pedidos Planificados;
RP = Recepciones Programadas.

modalidad se denominan «sistemas MRP sin cubos» (*Bucketless MRP Systems*) (T. F. Wallace, 1984).

Creemos que sería de bastante utilidad para los usuarios el poder disponer de ambos formatos de información, y que el sistema procesase y almacenase internamente los datos, asociándolos a fechas de días dentro del cubo de tiempo. Si el coste de procesamiento de dicha información es elevado, sólo restaría, como está ocurriendo en la práctica, utilizar datos agregados asignados a cubos de tiempo, normalmente semanales.

Un correcto Plan de Materiales no sólo beneficia al **Departamento de Operaciones** que, por un lado, podrá disminuir enormemente el tiempo dedicado a aceleración de pedidos y, por otro, el empleo extraordinario de recursos para hacer frente a una producción insuficiente en relación con los compromisos de los clientes. También el **Departamento de Compras** podrá reducir al mínimo la aceleración de pedidos a proveedores que, tradicionalmente, viene ocupando

mucho tiempo al personal de dicha área. Este podrá dedicarse, pues, a lo que debe constituir su función principal: mejorar las relaciones con los proveedores y asegurar la entrega de pedidos esenciales, búsqueda de fuentes alternativas de suministro, etc. Por otra parte, si se proporciona a los proveedores informes sobre los pedidos planificados, aquéllos podrán planificar adecuadamente su capacidad antes de recibir los pedidos concretos y se posibilitará una mejor interacción con el Plan de Materiales de la propia empresa. Cuando el proveedor también utiliza sistemas MRP, la coordinación se hace más fácil, mejorándose los resultados de ambos, especialmente si se utiliza el sistema EDI de intercambio electrónico de datos (ver Cuadro 4.2).

Cuadro 4.2. Un ejemplo de EDI en planificación de materiales

Para reflejar de forma clara el funcionamiento del sistema EDI (ver J. A. D. Machuca y otros, 1994, Apartado 10.4), utilizaremos un ejemplo que corresponde a la emisión de un pedido de cliente a proveedor (ver Figura 4.7 y Tabla 4.17). En el primer caso se dispondrá de un sistema tradicional y en el segundo se utilizará EDI. Ambos disponen de sistemas informáticos de gestión de almacén y facturación[8].

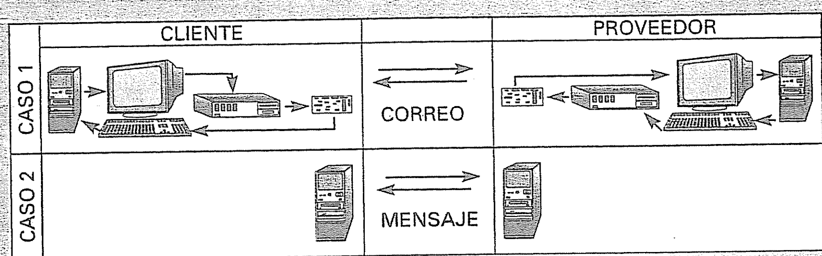


Figura 4.7. Comparación de EDI con la transmisión de información tradicional.

Tabla 4.17. Comparación de las duraciones de EDI con la transmisión de información tradicional

	TAREAS CASO I	Duración Ti	TAREAS CASO II	Duración Ti
T1	Elaboración pedido por cliente	5 seg.	Elaboración pedido electrónico	5 seg.
T2	Creación sobre por cliente	5 min.	Traducción a mensaje EDI estándar	10 seg.
T3	Envío sobre cliente hasta recepción proveedor	2 a 3 días	Transmisión EDI	4 seg.
T4	Toma datos del pedido (proveedor)	5 min.	Traducción EDI	10 seg.
T5	Comprobación inventario (proveedor)	1 seg.	Comprobación inventario (proveedor)	1 seg.
T6	Elaboración de factura (proveedor)	5 seg.	Elaboración factura electrónica	5 seg.
T7	Creación sobre (proveedor)	5 min.	Traducción a mensaje EDI estándar	10 seg.
T8	Envío sobre proveedor hasta recepción cliente	2 a 3 días	Transmisión EDI	4 seg.
T9	Toma de datos de factura (cliente)	5 min.	Traducción EDI	10 seg.
T10	Comprobación factura (cliente)	5 min.	Comprobación factura (cliente)	1 seg.
	TOTAL	4 a 6 días	TOTAL	1 min.

[8] Elaborado por Luna, P., Martínez, F. J., Cuesta, F., y Del Pozo, R.

Como caso real, podemos citar el de la compañía Ford (Emmelhainz, 1993, pág. 43) que ahora utiliza EDI para la comunicación con concesionarios y proveedores: los concesionarios realizan los pedidos de automóviles, los cuales son introducidos en el sistema EDI tan pronto como se reciben. A continuación, la información pasa directamente a los ordenadores de los proveedores en forma de pedidos de componentes, con lo que Ford evita la posibilidad de que el personal administrativo archive o lea incorrectamente las solicitudes. A la recepción del pedido electrónico normalizado, el ordenador del proveedor lo procesa directamente y pasa a confirmar de inmediato las fechas y condiciones de entrega mediante una respuesta electrónica normalizada. Así, el proceso de pedidos, que acostumbraba a prolongarse una semana como mínimo, se completa actualmente en cuestión de horas y con una mejora considerable en la precisión de la información que se maneja.

4.7.1.2. *Los informes de acción*

Esta salida indica, para cada uno de los items, la necesidad de emitir un nuevo pedido o de ajustar la fecha de llegada o la cantidad de algún pedido pendiente. Se pueden visualizar en las pantallas de los terminales así como a través de listados. *Aunque es el ordenador quien genera estos informes, es el planificador quien debe tomar las decisiones* a la vista de los mismos. Así, cuando en el primer período del horizonte de planificación, denominado **«cubo de acción»**, aparece el lanzamiento de un pedido planificado, se emitirá el correspondiente pedido siempre que se disponga de sus componentes en la cantidad necesaria. Hecho esto, se llevará a cabo una **transacción** para actualizar convenientemente el **Fichero de Registros de Inventarios**. En la próxima programación, el pedido emitido aparecerá en la fila de recepciones programadas y habrá desaparecido de la fila de lanzamiento de pedidos planificados, pues ya no existirá el cubo de tiempo en que estaba situado.

Puede ocurrir, sin embargo, que el planificador decida modificar la cantidad del lote o el tiempo de suministro (TS) especificado para un cierto componente. Así, puede suceder que, al emitir un pedido y asignarle el TS normal, la llegada prevista del correspondiente pedido planificado no sea suficiente (conjuntamente con las disponibilidades del período) para cubrir las necesidades brutas y el stock de seguridad del cubo de tiempo en cuestión. Este hecho puede darse por diversas circunstancias, como, por ejemplo, una cantidad de defectuosos inesperada, cambios de útima hora en el PMP, información errónea en el Fichero de Registros de Inventarios, etc. Ante esta eventualidad, el planificador debe determinar si el pedido puede incrementarse o, al menos, acelerarse y obtenerse en un TS inferior al estándar; para ello deberá consultar los informes de capacidad y hablar con el responsable de fabricación (caso de pedidos internos) o contrastar con el proveedor (si el pedido es externo). Si estas circunstancias son favorables incrementará el pedido o, en su caso, acortará el TS; en caso contrario, podrá optarse por romper el pedido en lotes más pequeños y acelerar parte del mismo.

También puede darse el caso contrario, es decir, que al aplicar los datos estándar, dé como resultado una cantidad superior a la requerida por las necesidades brutas y el stock de seguridad. Ello podría llevar a retrasar la llegada del pedido pendiente o a disminuir el tamaño del mismo.

4.7.2. Salidas secundarias del sistema MRP

Junto con las salidas primarias, tradicionales del MRP, pueden existir otras de utilidad que dependen del paquete de *software* empleado. A continuación comentamos someramente algunas de ellas. Las dos primeras servirán de ayuda al buen desarrollo del proceso de MRP; en cuanto a las restantes, si se valora la informa-

ción suministrada por el sistema en unidades monetarias, pueden ser de suma utilidad para distintos Departamentos de la firma. Así, por ejemplo, mediante la valoración en u.m. de las cantidades disponibles en inventario a lo largo del horizonte de planificación, se puede generar un listado que refleje las inversiones en inventario a realizar por la empresa en el próximo futuro. Si se valorasen en u.m. los pedidos de items a adquirir fuera de la empresa, dispondríamos de los compromisos futuros de compra a los que la empresa tendrá que hacer frente. Pasamos ahora a describir someramente algunas de estas salidas secundarias:

- *Mensajes individuales excepcionales.* Son generados como respuesta a las transacciones de inventario introducidas en el Sistema y sólo aparecen en las pantallas de los terminales. Entre estos mensajes se encuentran los siguientes: código identificativo no existente, código de la transacción no existente, exceso en el número de dígitos de la cantidad de un pedido pendiente de recibir o de la cantidad de disponible, etc. Estos mensajes desarrollan un papel fundamental al dotar al sistema de una capacidad de autodetección de errores que ayuda enormemente a mantener la exactitud de los datos.
- *Informe de las Fuentes de Necesidades.* Este informe (*Pegged Requirement Report*) relaciona las necesidades brutas de cada ítem con las fuentes que las producen, ya sean demandas de piezas de repuesto o lanzamientos de pedidos planificados de items de niveles superiores. La enorme utilidad de esta información pudo verse en el Apartado 4.6.3.4.
- *El Informe de Análisis ABC en función de la planificación.* Refleja el estado y el valor de las existencias previstas en stock en función de un análisis ABC (ver Apartado 1.5, Capítulo 1). Se trata de una información que proporciona un medio ágil y eficaz de reacción para la determinación de los distintos tipos de items en la inversión necesaria en inventario.
- *El Informe de Material en Exceso.* El sistema MRP es capaz de determinar fácilmente aquellas existencias que van a resultar excedentes, una vez cumplidas las necesidades previstas por el Programa Maestro de Producción y las demandas de los diferentes items en inventario. Dicha información, valorada en u.m. es la que se refleja en este informe.
- *El informe de Compromisos de Compra (Purchase Commitment Report).* Refleja el valor de los pedidos planificados a proveedores, representando los correspondientes pagos durante los distintos períodos de tiempo.
- *El Informe de Análisis de Proveedores.* Resume el comportamiento de los proveedores respecto a los tiempos de suministro, precio y calidad, sirviendo de gran ayuda al Departamento de Compras para la elección del proveedor de futuros pedidos. Para la obtención de este tipo de informe bastará con que el sistema MRP guarde la información relativa a los pedidos externos que se han venido realizando para cada ítem.

Estas salidas secundarias que acabamos de ver, y que podrán variar mucho de una empresa a otra, dependiendo de las características concretas en que se desenvuelva, no son más que una muestra de las amplias posibilidades que abre el uso de un sistema MRP.

4.8. CONSIDERACIONES FINALES: RELACION CON OTRAS AREAS DE LA EMPRESA

No hemos considerado hasta aquí las restricciones de capacidad y hemos programado la fabricación y los inventarios sin tener en cuenta dicho factor, el cual

abordaremos en el próximo capítulo cuando tratemos los sistemas MRP de bucle cerrado. Sin embargo, la utilidad del MRP no acaba en el campo de la producción e inventarios, sino que se va extendiendo a otras áreas de la empresa. Por ejemplo, se está tomando conciencia de que el MRP puede resultar una herramienta importante para mejorar la planificación y el control financieros. Cuando se acepta un Programa Maestro de Producción, el gerente financiero acepta el compromiso de financiar su realización. A partir de la misma base de datos utililizada para obtener la planificación de pedidos y de capacidad puede deducirse, en forma resumida, la programación de las necesidades de recursos financieros, los cuales son tratados como cualquier otro componente del producto. Del mismo modo, puede ser utilizado para el cálculo de costes de los diferentes productos a partir de sus respectivas listas de materiales y del uso de los diferentes recursos. Al ponerse en marcha el sistema, sus salidas permitirán vigilar los presupuestos y controlar los costes (ver Campbell y Porcano, 1979). Asimismo, incorporando información sobre los distintos tipos de mano de obra necesarios para cada producto puede realizarse una explosión análoga a la efectuada con los materiales. Ello permite hacer previsiones de personal, constituyendo, pues, un instrumento valioso en este campo.

Lógicamente, como indicábamos en el Apartado 4.1, se suele comenzar empleando el MRP para planificar y programar inventarios y producción (sistema MRP originario), incluyendo a continuación la planificación de la capacidad de recursos (MRP CL). Por último, una vez alcanzado lo anterior puede pensarse en ampliar el sistema a la planificación y control de otros departamentos de la empresa, tal como mencionábamos anteriormente (MRP II). Es interesante hacer notar que mediante estos sistemas se consigue coordinar conjuntamente las actividades de las distintas áreas de la empresa, lo cual está de acuerdo con la concepción sistémica de la misma y es la mejor forma de conseguir beneficios sustanciales de la aplicación del MRP. Todas estas posibilidades se verán más claramente en el próximo capítulo, aunque en el que aquí finaliza ha podido observarse la interacción con:

- **Departamento de Compras**, a través de Plan de Materiales, tiempos de suministros externos, informes de acción que implican ajustes en pedidos externos, etc.
- **Ingeniería**, a través de la Lista de Materiales.
- **Area Financiera**, por los niveles de stock de seguridad o los aspectos económicos derivados de las posibles técnicas de dimensionado de lotes.
- **Contabilidad y Sistemas de Información**, que deben suministrar la información necesaria para el desarrollo del proceso de explosión de necesidades.

REFERENCIAS Y BIBLIOGRAFIA

NOTA: El presente capítulo se ha basado fundamentalmente en tres artículos de J. A. Domínguez Machuca (1984, 1985a, 1985b). La bibliografía utilizada en los mismos, junto con algunas nuevas referencias, aparecen a continuación.

ASKIN, RAGHAVAN: «The effect of lot-sizing on workload variability», Journal of Operations Management, vol. 4, núm. 1, 1983.

BERRY-WHYBARK: «Research Perspectives for Material Requirement Planning Systems», *Production and Inventory Management*, vol. 16, núm. 2, 1975.

BOBECK-HALL: «The Master Schedule: New Financial Tool», en «Master Production Scheduling Reprints», APICS, 1977.

BRINSDON, A. J.: «Building the financial interface to manufacturing inventory systems», *Production and Inventory Management*, vol. 24, núm. 4, cuarto trimestre, 1983.

BROWN: «Materials Management Systems», John Wiley and Sons, 1977.

CAMPBELL y PORCANO: «The contribution of MRP to Budgeting and Control», Production and Inventory Management, vol, 20, núm. 2, 1979.

CASE: «What is This Thing Called Manufacturing Resource Planning», 23rd Annual Conference Proceedings, APICS, 1980.

CHASE y AQUILANO: «Production and Operations Management», Ed. Richard D. Irwin, 1991.

COOK: «Operations Management. Theory and Problems», Ed. McGraw-Hill, 1977.

DE MATTEIS y MENDOZA: «An Economic Lot Size Technique», *IBM Systems Journal*, vol. 7, 1968.

DEIS: «Production and Inventory Management in the Technological Age», Prentice Hall, 1983.

DILLWORTH, J. B.: «Production and Operations Management», McGraw-Hill, 1993.

EDSON: «The realities of implementating MRP», 23rd Annual Conference Proceedings, APICS, 1980.

EISENBERG: «A Communication Oriented MRP System», 23rd Annual Conference Proceedings, APICS, 1980.

EMMELHAINZ, M. A.: «EDI, A Total management guide», Van Nostrand Reinhold, 1993.

GAITHER, N.: «Production and Operations Management». The Dryden Press, 1992.

HALL: «Manufacturing Control for Emerging Growth Companies», 23rd Annual Conference Proceedings, APICS, 1980.

HEIZER, J., y RENDER, B.: «Production and Operations Managment» (Cap. 14), Allyn and Bacon, 1991.

IBM: «The Production Information and Control System», GE20-280-2.

LUNA, P., y GARCÍA, S.: «Las salidas de un sistema MRP», *Alta Dirección*, núm. 150, 1990.

MACHUCA, J. A. D.: «Planificación de las Necesidades de Materiales» (I), *Alta Dirección*, núm. 118, 1984.

MACHUCA, J. A. D.: «Planificación de las Necesidades de Materiales» (II), *Alta Dirección*, núm. 120, 1985a.

MACHUCA, J. A. D.: «Planificación de las Necesidades de Materiales» (III), *Alta Dirección*, núm. 121, 1985b.

MILLER y GILMORE: «Materials Managers: Who Needs Them?», *Harvard Business Review*. Julio-agosto 1970.

MONKS: «Operations Management. Theory and Problems». McGraw-Hill, 1977.

MOORE y HENDRICK: «Production and Operations Management», R. D. Irwin, 1980.

NEVILLE, M. P.: «Scheduling and Priorities which, when, why?», *Planning and Control Seminar Proceedings*. APICS, marzo 1982.

ORLICKY: «Materials Requirements Planning» McGraw-Hill, 1975.

PENDLETON, WILLIAM, E.: «Lead Time: the Long and Short of it», Operations Scheduling Seminar Proceedings, APICS, San Francisco, enero 1977.

PETERSON y SILVER: «Decisions System for Inventory Management and Production Planning», John Wiley and Sons, 1979.

ROAT y LOMAS: «DRP: Cornerstone of MRP II», 23rd Annual Conference Proceedings, APICS, 1980.

SCHROEDER: «Operations Management», McGraw-Hill, 1993.

SCHROEDER, ANDERSON, TUPY y WHITE: «A study of MRP Benefits and Costs», *Journal of Operations Management*, vol. 2, núm. 1, 1981.

SILVER y MEAL: «A Heuristic for selecting Lot Size Requirements for the case of a Deterministic Time-Varying Demand Rate and Discrete Opportunities for Replenishements», Production and Inventory Management, vol. 14, núm. 2, 1973.

SMITH: «Planificación de las necesidades de materiales», en *Hax: Dirección de operaciones en la empresa*, Hispano Europea, 1983.

SMITH, ABAIR y PARR: «Smith Valve Corporation MRP Systems. If you don't your competition will», 23rd Annual Conference Proceedings, APICS, 1980.

VOLLMAN, T. E.; BERRY, W. L., y WHIBARK, D. C.: «Manufacturing Planning and Control Systems», Richard D. Irwin, 1988.

WAGNER y WITHIN: «Dynamic version of the economic lot size model», *Management Science*, vol. 5, núm. 1, 1958.

WALLACE, J. F. (editors): «APICS Dictionnary», 1984.

WHIBARK y WILLIAMS: «Materials Requirement Planning Under Uncertainty», *Decision Sciences*, vol. 7 núm. 4, 1976.

WIGHT: «MRP II: Unlocking America's Productivity Potential». CBI Publishing Co., 1981.

WRIGHT: «Variable Lead Times. Who needs them?», 23rd Annual Conference Proceedings, APICS, 1980.

CAPITULO 5

LOS SISTEMAS MRP (II): MRP II, *VERSUS* MRP

5.1. LOS SISTEMAS MRP EVOLUCIONADOS

Como ya comentamos en el capítulo anterior, el MRP originario fue el punto de partida para modelos más evolucionados, en la búsqueda de un sistema completamente integrado que respondiera al enfoque jerárquico descrito en el Capítulo 1 (ver Figura 1.4). En este sentido, la eficacia del sistema primitivo se veía limitada, entre otras cosas, por la calidad del Programa Maestro de Producción, *input* fundamental que se obtenía externamente. El MRP originario tampoco permite conocer qué actividad ha de desarrollar cada unidad productiva en cada momento de tiempo para fabricar los pedidos planificados en el orden establecido, ni tampoco si se cuenta o no con la capacidad suficiente para hacerlo. Debido a ello, se desarrollaron técnicas de Gestión de Talleres (ver Capítulo 9) y de Planificación de Capacidad. El paso siguiente fue inevitable: integrar los aspectos mencionados al sistema originario, dando lugar al que se conoce como **MRP de Bucle Cerrado** (*MRP Closed Loop CL*), datando los primeros intentos de 1975 (Orlicky, pág. 244 y ss.).

Aún existía una separación entre la gestión de Producción-Inventarios-Compras (integradas por MRP CL) y el resto de áreas de la empresa, básicamente Contabilidad y Finanzas, faltando además un imprescindible eslabón de conexión con el Plan Estratégico. Hay que esperar a 1979 para ver nacer el embrión de MRP II (Wight, 1979) como un intento de integrar todo en un único sistema, usando una sola Base de Datos. A partir de ese momento comenzó un largo proceso de desarrollo de MRP II, el cual, a nuestro juicio, aún no ha concluido.

5.1.1. El MRP de Bucle Cerrado (*MRP Closed Loop*)

Este sistema parte de un Plan Agregado de Producción elaborado fuera del Sistema, el cual será convertido en un PMP por el módulo de Programación Maestra. Este último será el punto de partida para la planificación de la capacidad a medio plazo mediante una técnica aproximada *(Rough-Cut)*. Si el plan resultante es viable, el Programa Maestro pasará a servir de *input* al módulo MRP. Los Planes de Pedidos a proveedores de MRP irán destinados a la gestión de compras, mientras que los de pedidos a taller servirán para la Planificación de Capacidad (CRP). Si el plan a corto plazo deducido de CRP es viable, los pedidos pasarán a formar parte de la Gestión de Talleres, en la que el sistema controlará las prioridades y programará las operaciones (normalmente con Listas de Expedi-

ción). La situación en los talleres y los planes de capacidad a corto plazo servirán al sistema para controlar la capacidad, normalmente usando el Análisis *Input/Output*[1]. El término bucle cerrado implica «que no sólo se incluye cada uno de esos elementos en el Sistema global, sino que también hay retroalimentación para mantener planes válidos en todo momento» (Gray, 1987, pág. 235). De acuerdo con lo anterior, las características del MRP de Bucle Cerrado podrían resumirse de la forma siguiente:

- Es prospectivo, ya que la planificación está basada en el Plan Agregado de Producción (ver Capítulo 3).
- Incluye la Programación Maestra de la Producción, la Planificación de Necesidades de Materiales, la Planificación de Capacidad a corto y medio plazo, el Control de la Capacidad y la Gestión de Talleres.
- Trata de forma integrada todos los aspectos que contempla, dado que la base de datos y el sistema son únicos para todas las áreas de la empresa.
- Actúa en tiempo real, usando terminales *on-line*, aunque algunos de los procesos se producirán en *batch* (por ejemplo la explosión de materiales).
- Tiene capacidad de simulación, de forma que permite determinar qué ocurriría si se produjeran determinados cambios en las circunstancias de partida.
- Actúa de la cúspide hacia abajo, pues el proceso ha de comenzar en el Plan Agregado de Producción.

5.1.2. El sistema MRP II (*Manufacturing Resource Planning*)

Al igual que ocurre con el MRP de Bucle Cerrado, existen múltiples definiciones en la literatura, que intentan describir al MRP II basándose en la integración de áreas funcionales que realiza[2] o en que se trata de una extensión del MRP de Bucle Cerrado[3]; aunque quizá la más completa es la que aparece en el Diccionario APICS (Wallace, 1984, pág. 18). Por nuestra parte, lo definiremos como «una ampliación del MRP de Bluce Cerrado que, de forma integrada y mediante un proceso informatizado *on-line*, con una base de datos única para toda la empresa, participa en la planificación estratégica, programa la producción, planifica los pedidos de los diferentes items componentes, programa las prioridades y las actividades a desarrollar por los diferentes talleres, planifica y controla la capacidad disponible y necesaria y gestiona los inventarios. Además, partiendo de los *outputs* obtenidos, realiza cálculos de costes y desarrolla estados financieros en unidades monetarias. Todo ello con posibilidad de corregir periódicamente las divergencias entre lo planificado y la realidad, pudiendo además simular diferentes situaciones mediante la alteración de los valores de las variables que incluye, y expresando las variaciones que se darían en los resultados» (J. A. D. Machuca y S. García, 1991, pág. 16).

La definición anterior resalta el hecho de que no debe considerarse a MRP II como un sistema estándar caracterizado por el empleo de técnicas y formas concretas para el desarrollo de cada una de sus fases; éstas dependerán en gran medida del software adquirido, de los posteriores desarrollos realizados por la empresa, etc. Por el contrario, hemos querido destacar que MRP II representa

[1] Todas estas técnicas serán explicadas en el presente capítulo y en el Capítulo 9.
[2] Ver, por ejemplo, Davenport (1983, pág. 63), Buker (1987, pág. 120) y Wallace (1988, pág. 9).
[3] Ver, por ejemplo, Millard (1985, pág. 22) o Edelman (1987, pág. 404).

más bien una filosofía para los sistemas informatizados de planificación y control de los recursos en la empresa. Así pues, cualquier sistema que se adecúe a la definición realizada podrá considerarse como MRP II, independientemente de la forma en que desarrolle las funciones y actividades mencionadas. En cuanto a sus características, al ser una ampliación del MRP de Bucle Cerrado, comparte las de éste y además:

- Participa en la planificación estratégica, en el cálculo de costes y en el desarrollo de estados financieros.
- Permite planificar, programar, gestionar y controlar todos los recursos de la empresa manufacturera.
- Debe ser capaz de convertir en unidades monetarias las cifras derivadas de la explotación en unidades físicas.

5.1.3. Breves consideraciones sobre la confusión terminológica

Una vez definido cada uno de los sistemas estamos en condiciones de acometer el problema de la confusión terminológica existente, básicamente entre MRP de Bucle Cerrado y MRP II. De los apartados anteriores puede deducirse que el segundo incluye al primero, pero no son lo mismo. Sin embargo, son numerosos los autores que utilizan la denominación MRP II para referirse a lo que en realidad es el MRP de Bucle Cerrado, o viceversa, con lo que se da un alto grado de confusión entre los dos términos. En otros casos, se utilizan incluso denominaciones como MRP I, MRP II y MRP III (Schroeder, 1992, pág. 497).

Por nuestra parte (Apartados 5.1 y 5.1.2), y en aras a lograr una adecuada precisión terminológica, estamos de acuerdo con la gran mayoría de autores, que diferencian entre MRP, MRP de Bucle Cerrado y MRP II, incluyendo a la sociedad APICS (Wallace, 1984, págs. 15 y 18), impulsora y gran responsable de su difusión, o a autores pioneros y, en buena parte, creadores de estos sistemas (Wight, 1981, pág. 57).

5.2. LOS *INPUTS* DEL SISTEMA MRP II

Es evidente que un Sistema tan complejo como MRP II, que desarrolla tantas funciones, ha de emplear un amplio conjunto de datos. Por nuestra parte, vamos a considerar tres *inputs* fundamentales:

- **Plan de ventas** (o las previsiones, en su caso), a partir del cual se establecerá el Plan Agregado de Producción, que da inicio a las diferentes fases de planificación y programación.
- **Base de Datos** del Sistema.
- **Retroalimentación** desde las fases de ejecución a las de planificación.

Dado que el Plan de Ventas habrá de existir en la empresa (se use o no un sistema MRP II) y que su papel en la obtención del Plan Agregado de Producción fue ya analizado en los Capítulos 1 y 2, vamos a pasar a ocuparnos de la Base de Datos. Es fundamental que ésta se estructure de forma que no se duplique la información, lo cual, por una parte, disminuye la capacidad de memoria necesaria. Por otro lado, esta información será utilizada por todo el Sistema, por lo que, para el buen funcionamiento del mismo, serán indispensables,

tanto la mencionada ausencia de duplicidad como la fiabilidad de los datos. Cualquier error en la creación o mantenimiento de la Base de Datos repercutirá negativamente en los resultados obtenidos. Las ventajas de que ésta sea única son importantes, aunque no debe olvidarse que conllevan un coste: la servidumbre de la seguridad.

En cuanto a la estructura y composición de la Base de Datos, puede diferir con el software empleado, con el cual variará, además, la interconexión de los ficheros. No obstante, vamos a describir a continuación una estructura en la que aparecen los campos más comunes, agrupando los datos según sus características y la función en que se usan fundamentalmente. Dicha descripción no pretende ser exhaustiva (lo cual requeriría muchas páginas de este libro), sino sólo una ilustración del contenido estándar de ésta, ciñéndonos a los ficheros de *inputs*. El Cuadro 5.1 resume el contenido de los principales ficheros de la Base de Datos de MRP II.

Cuadro 5.1 Principales ficheros de la Base de Datos de MRP II

- **Registro de Inventarios**, que contiene toda la información básica de cada ítem, la cual será suministrada por diferentes áreas: departamento técnico, contabilidad, planificación, etc. Se puede estructurar en varios segmentos:
  - *Maestro*, con los datos más estables para la planificación.
  - *De Estado*, con los datos de evolución de necesidades, disponibilidades en inventario, etc.
  - *De Costes*, con los valores de costes que permitirán el cálculo de los costes unitarios, los cuales también serán vertidos en el fichero.
- **Maestro de Familias**, que contiene los datos para la desagregación del Plan en Programa Maestro (porcentajes de descomposición de familias en productos), para la Planificación Agregada de Capacidad y, en general, los datos agregados de planificación a medio plazo.
- **Listas de Materiales** (ver capítulo anterior).
- **Maestro de Rutas**, con la secuencia de operaciones que ha de ser desarrollada para cada ítem.
- **Maestro de Centros de Trabajo**, con toda la información relativa a los CT que han de ser empleados en el desarrollo de las operaciones: eficiencia, utilización, capacidad disponible, tiempos medios de cola, etc.
- **Maestro de Operaciones**, con todas las características de las mismas necesarias para el desarrollo de las funciones del sistema: centro de trabajo principal y alternativo para su desarrollo, tiempo de preparación y ejecución requerido, etc.
- **Maestro de Herramientas**, con los datos relativos a herramientas de disponibilidad limitada asignadas a ciertas operaciones.
- **Calendario de Taller**, en el que se establecen los días laborables relacionados con el calendario natural con su propia numeración para el sistema.
- **Maestro de Pedidos**, en el que se recogen los datos relativos a los pedidos realizados y a los planificados. Consta de tres segmentos:
  - *Pedidos a Taller.*
  - *Pedidos a Proveedores.*
  - *Pedidos de Clientes.*
- **Maestro de Proveedores**, con toda la información necesaria acerca de los mismos.
- **Maestro de Clientes**, con todos los datos necesarios de identificación.

5.3. LA MECANICA DEL SISTEMA

Describir en pocas palabras la mecánica de un sistema MRP II es una tarea harto compleja, especialmente si consideramos la gran cantidad de funciones que incluye y la diversidad de formas que algunas de ellas pueden adoptar (ver Apartado 5.1.2). No obstante, intentaremos hacer una descripción de la misma, en la que se contemplen de forma general la sucesión de funciones que engloba.

Este Sistema debería partir, normalmente, de los datos sobre demanda recabados en el mercado (suele contar con un módulo de técnicas de previsión, como en el caso de MAPICS DB[4] o MAS-H[5]) o del Plan de Ventas a largo plazo desarrollado por la Alta Dirección, al que tendrá que responder con un Plan de Producción. A partir de éste, elabora un **Plan de Producción Agregado**, para lo que podría usarse cualquier técnica, siendo las más habituales las de simulación o prueba y error (ver Capítulo 3). El Plan Agregado sirve de entrada para la Planificación de Capacidad a medio plazo, que debe determinar la viabilidad del mismo; las técnicas más usuales (CPOF y Listas de Capacidad), ya fueron descritas en el Capítulo 3. Si el **Plan de Capacidad Agregado** es viable, los Planes de Producción y Ventas a largo plazo servirán para establecer un Plan de Ingresos y Costes para dicho horizonte, así como los inventarios proyectados. En este tipo de software no suele contemplarse el desarrollo de Presupuestos de Capital completos y dichos planes son aproximados, derivados de los Planes a largo plazo mediante procedimientos muy rudimentarios (multiplicar unidades de familia a producir por su coste y unidades a vender por su precio de venta).

Por otra parte, comprobada la viabilidad del Plan de Producción Agregado, éste sirve de *input* para que el Sistema desarrolle todas las actividades propias de un Sistema de Bucle Cerrado. Se comenzará con la desagregación, lo cual lleva al **Programa Maestro de Producción** periodificando y dimensionando los lotes (Apartado 3.9). A partir del PMP se realizará la **Planificación Aproximada de la Capacidad**, normalmente mediante las técnicas de las Listas de Capacidad y Perfiles de Recursos (Apartado 3.10). Con el PMP aceptado se desarrollará la Planificación de Materiales (Capítulo 4), cuya viabilidad será comprobada con la **Planificación Detallada de la Capacidad**, a desarrollar mediante la técnica CRP, que analizaremos en el próximo apartado. Los pedidos planificados de items adquiridos en el exterior servirán de entrada para la **Programación de Proveedores y Gestión de Compras**; aquellos otros que se fabricarán en la empresa servirán de *input* a la **Gestión de Talleres**. Esta programará los momentos de entrada y salida de cada pedido en cada Centro de Trabajo (CT) en base a las distintas prioridades existentes. El período y forma de programar las operaciones dependerá de la técnica seguida. Además de las técnicas tradicionales, que veremos en el Capítulo 9, también cabría la opción de utilizar la técnica Kanban (Apartado 6.4), con lo que se tendría un sistema híbrido MRP II/JIT (Apartado 7.12).

De otro lado, el software de MRP II incorpora procedimientos para el desarrollo del **Control de Capacidad a corto plazo**, de forma que se compruebe la adecuación entre las capacidades planificadas y desarrolladas en los CT y las cargas previstas y reales en los mismos, estableciendo además la evolución de las Colas de Espera. Dicho proceso suele abarcar varias semanas, y la técnica más empleada es el Análisis (o Control) *Input/Output* (Capítulo 9).

En el terreno de **finanzas/contabilidad**, este sistema también desarrolla una serie de funciones, más o menos completas en función del caso. Debe contemplar, al menos, un sistema de cálculo y recálculo de Costes Estándar, el cual permite distribuir los costes de la empresa entre los diferentes items, operaciones y CT. Suele trabajarse con poca diferenciación de conceptos de costes y pueden existir diferentes sistemas; no obstante, en el Apartado 5.5 describiremos un proceso con la filosofía de cálculo de costes que suele incluirse en la mayor parte de los mismos. En cuanto a otras funciones conectadas con finanzas, el software comer-

---

[4] Paquete registrado de International Business Machines.
[5] Paquete de Martin Marietta Data Systems Inc.

cial suele incluir sólo algunas básicas. Las más usuales son el desarrollo de un Presupuesto de Ventas (normalmente para el corto plazo, multiplicando los pedidos de clientes por los precios de venta, y para el largo plazo, como comentamos al principio), un Presupuesto de Compras (multiplicando las cantidades a comprar de items en el Plan de Pedidos por los precios medios de compra) y un presupuesto de inventarios proyectados. No obstante, cualquier otra opción financiera cabría dentro de este sistema. El desarrollo de Presupuesto de Pagos y Cobros o de Aplicaciones y Medios a corto plazo, podría incluirse en el mismo (por ejemplo: García, S., 1992). Con lo expuesto en el presente apartado hemos pretendido ilustrar el proceso que caracteriza los sistemas MRP II, así como la diversidad que puede existir en algunas de sus funciones.

5.4. CRP (*CAPACITY REQUIREMENTS PLANNING*): PLANIFICACION DE NECESIDADES DE CAPACIDAD

Para analizar el proceso CRP, vamos a apoyarnos en el Ejemplo 5.1.

EJEMPLO 5.1. CRP: Planteamiento del Problema

Se trata de una empresa fabricante de dos productos, P1 y P2. Sus correspondientes Listas de Materiales aparecen en la Figura 5.1 y las rutas de cada uno de los items fabricados por la empresa en la Figura 5.2, indicándose el Centro de Trabajo (CT) donde se desarrollan.

En cuanto al detalle de los tiempos de las operaciones, éstos se especifican en la Tabla 5.1, en la cual se indican las operaciones y rutas a las que pertenecen, así como distintos datos de interés, cuyo significado o/y forma de cálculo se abordaron en el Apéndice 2.A (excepto el tiempo medio de desplazamiento de materiales al CT, que se definió en el Apartado 1.4.2.3).

Los datos de los CT aparecen en la Tabla 5.2, indicándose, para cada uno de ellos, la capacidad diaria disponible en horas reales y estándar, los factores de Eficiencia (E_k) y Utilización (U_k), el tiempo de preparación medio en horas estándar (Tp_k, que para simplificar se considera igual para cada CT y se usará para cada operación que se realice en ellos), así como el tiempo de cola medio en horas estándar.

Como veremos más adelante, para periodificar las cargas necesitamos, además, los restantes componentes del tiempo de suministro (ver Apartado 1.4.2). Para simplificar los cálculos, trabajaremos con un tiempo medio de confección de cuatro horas (reales) para cualquier pedido; el tiempo de espera (de 0,5 horas reales para cualquier ítem), sólo se considerará tras la última operación de la ruta; el tiempo medio de inspección de un pedido de cualquier ítem será de cuatro horas reales.

Por último, la Tabla 5.3 recoge el informe de producción, en el que se detallan: los pedidos en curso de fabricación (recepciones programadas), la operación que

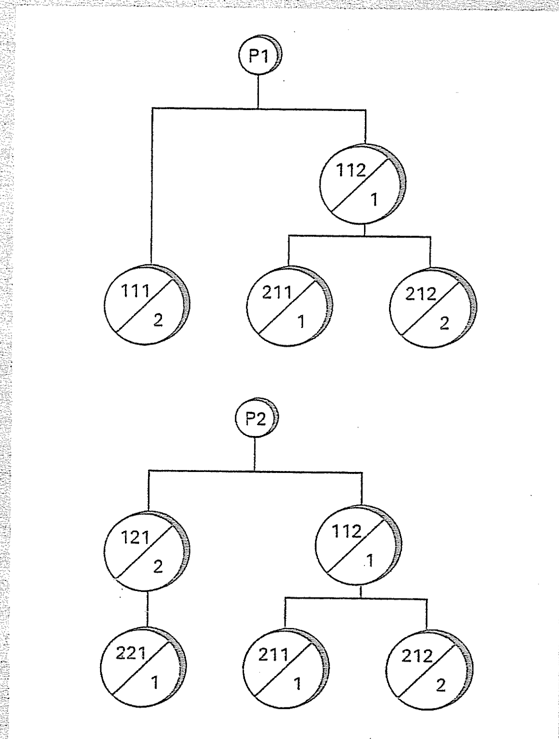


Figura 5.1. Listas de Materiales de P1 y P2.

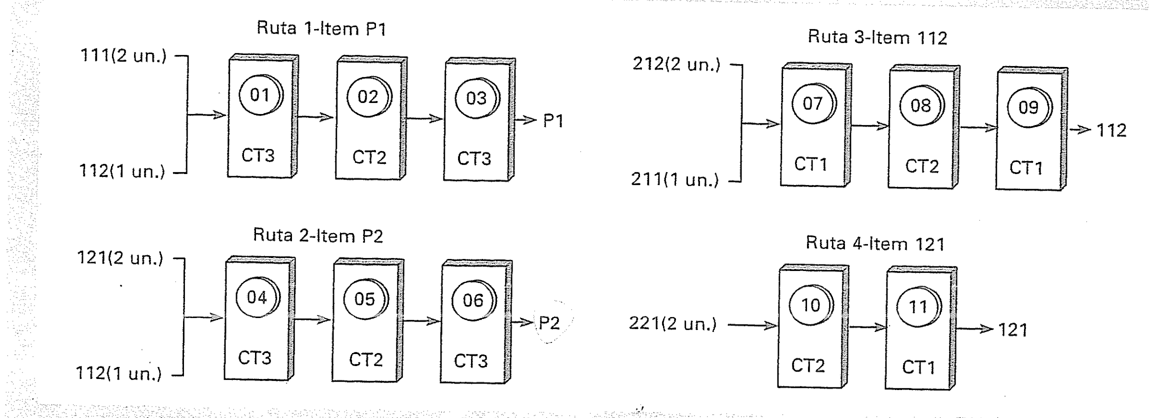


Figura 5.2. Rutas de obtención de productos finales y componentes.

Tabla 5.1. Datos de las Operaciones

Item	Ruta	Operación	CTk	Tiempo ejecución, te_i (minutos estándar)	Tiempo medio desplazamiento (horas)	Aprovechamiento, a_i	Factor v_i	Tiempos de carga unitarios tc_{ijk} (h.e.)	
P1	1	O1	CT3	5	1	0,95	0,9124	tc_{1-P1-3}	0,089
		O2	CT2	1	1	0,98	0,9604	tc_{2-P1-2}	0,022
		O3	CT3	1,5	2	0,98	0,98	tc_{3-P1-3}	0,031
P2	2	O4	CT3	5	0,4	0,95	0,8845	tc_{4-P2-3}	0,092
		O5	CT2	2,5	1	0,95	0,931	tc_{5-P2-2}	0,051
		O6	CT3	0,5	1	0,98	0,98	tc_{6-P2-3}	0,018
112	3	O7	CT1	5	0,6	0,9	0,8381	$tc_{7-112-1}$	0,088
		O8	CT2	5	0,5	0,97	0,9312	$tc_{8-112-2}$	0,089
		O9	CT1	4,4	0,5	0,96	0,96	$tc_{9-112-1}$	0,079
121	4	O10	CT2	2	0,8	0,95	0,855	$tc_{10-121-2}$	0,037
		O11	CT1	1,12	0,8	0,9	0,9	$tc_{11-121-1}$	0,023

estaba ejecutándose al final de la semana anterior (día 0 para nuestro horizonte de planificación actual), el tiempo que falta para terminar de ejecutarse el pedido (en h.e.) y el tamaño del lote a recibir.

En cuanto a los datos necesarios para la Planificación de Materiales de los items, éstos se encuentran en el Segmento Maestro (Tabla 5.4) y de Estado (Tabla 5.5) del Fichero de Registros de Inventarios. Se ha detallado

Tabla 5.2. Datos de los Centros de Trabajo

CTk	Capacidad diaria		E_k	U_k	Tiempo medio de preparación (h.e.)	Tiempo medio de cola (h.e.)
	h.r.	*h.e.*				
CT1	8,5	8,16	0,98	0,98	1	3
CT2	8,5	6,5	0,9	0,85	1	4
CT3	8,5	5,45	0,8	0,8	1	4

Tabla 5.3. Informe de Producción

Item	Cantidad a recibir	Operación en curso	Tiempo que le resta (h.e.)
P1	170	3 en CT3	3
P2	100	4 en CT3	4
112	113 186	8 en CT2 7 en CT1	1 1,8
121	226	10 en CT2	8

sólo la parte que interesa de cara al desarrollo del ejemplo, omitiéndose, además, los datos correspondientes a los items adquiridos en el exterior. Otros aspectos de interés son los siguientes:

a) Los tiempos de suministro empleados en la Planificación de Materiales se expresan en semanas de cinco días laborables.

b) El aprovechamiento de cada ítem será igual al aprovechamiento de su ruta[6].

c) Al existir defectuosas, es necesario distinguir entre tamaño de lote de emisión y de recepción, de forma que para un ítem *j*, el primero (Qe_j) sería igual al segundo (Qr_j) partido por A_j.

d) En este sentido, las recepciones programadas que constan en el Segmento de Estado, están expresadas en unidades a recibir, añadiéndose, además, las fechas de recepción de pedidos planificados (todas ellas se refieren al final del último día del período indicado). Estos mismos pedidos son los que constan en el Informe de Producción de la Tabla 5.3 y también en unidades a recibir.

El PMP, que ha sido calculado de acuerdo con los Apartados 3.8 y 4.5, aparece en los dos sectores superiores de la Tabla 5.6. Los dos sectores inferiores de la tabla contienen la explosión de materiales de los restantes items fabricados (ver Apartado 4.5). En todos los casos, puede apreciarse que, como se indicó en *c*), los pedidos planificados (lotes a emitir) se calculan dividiendo las cantidades que aparecen en las filas de recepción (pedidos a recibir) por el aprovechamiento (A_i) de la ruta del ítem correspondiente.

Tabla 5.4. Segmento Maestro del Registro de Inventarios (sólo para items fabricados)

Item	Stock de seguridad	Método dimensionado (lote)	*Ts* (semanas)	Aprovechamiento (*Aj*)	Lote medio ($\bar{Q}ej$)	Lote medio ($\bar{Q}rj$)
P1	40	*EOQ*; $Q^* = 170$	2	0,9124	186	170
P2	20	Lote a lote (mínimo 100)	2	0,8845	113	100
112	0	Lote a lote	3	0,8381	213	179
121	0	Lote a lote	2	0,855	264	226

Tabla 5.5. Segmento de Estado del Registro de Inventarios (sólo items fabricados)

Item	Disponibilidades	Recepciones programadas
P1	40	170 en 1
P2	60	100 en 2
112	186	113 en 2 186 en 3
121		226 en 2

[6] Como se vio en el Apartado 2.A.5, el aprovechamiento de ítem *j* (A_j) viene dado por el producto de los aprovechamientos de las operaciones de su ruta (a_i en la Tabla 5.1).

Tabla 5.6. Explosión de Necesidades MRP

Item	Nivel	SS	Conceptos	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
P1	0	40	Necesidades brutas	60	70	70	80	80	90	90	100	90	90	100	100
			Disponibilidades	40	150	80	180	100	190	100	180	80	160	70	140
			Recepciones programadas	170											
			Necesidades netas			30		20		30		50		70	
			Recepción pedidos planificados			(170)		170		170		170		170	
			Pedidos planificados	(186)	$\div A_1$	186		186		186		186			
P2	0	20	Necesidades brutas	40	40	40	50	50	50	60	60	70	70	80	90
			Disponibilidades	60	20	80	40	90	40	90	30	70	100	30	50
			Recepciones programadas		100										
			Necesidades netas				30		30		50	20		70	60
			Recepción pedidos planificados				(100)		100		100	100		100	100
			Pedidos planificados		(113)	$\div A_2$	113		113	113		113	113		
112	1	0	Necesidades brutas	186	113	186	113	186	113	299		299	113		
			Disponibilidades	186											
			Recepciones programadas		113	186									
			Necesidades netas				113	186	113	299		299	113		
			Recepción pedidos planificados		$\div A_3$		(113)	186	113	299		299	113		
			Pedidos planificados	(135)	222	135	357		357	135					
121	1	0	Necesidades brutas		226		226		226	226		226	226		
			Disponibilidades												
			Recepciones programadas		226										
			Necesidades netas				226		226	226		226	226		
			Recepción pedidos planificados			$\div A_4$	(226)		226	226		226	226		
			Pedidos planificados		(264)		264	264		264	264				

CRP es una técnica que *planifica las necesidades de capacidad de los pedidos planificados emitidos por MRP, bajo la consideración de la disponibilidad ilimitada de capacidad* [7]. Como gran novedad frente a las técnicas *Rough-Cut* (descritas en el Capítulo 3), CRP tiene en cuenta los pedidos planificados de todos los items, y no sólo los productos finales. La información de partida que requiere es, sin duda, mucho más abundante (Tablas 5.1. a 5.6), aunque, como contrapartida, también es mucho más exacto el Plan de Capacidad que desarrolla. Esta técnica convierte los pedidos a fabricar del Plan de Materiales del MRP en necesidades de capacidad en cada Centro de Trabajo, incluyendo, además, las necesidades derivadas de las recepciones programadas (parte que les queda por realizar hasta su conclusión). Al actuar a partir del Plan de Materiales, se replanificará con éste, teniendo, además, los mismos cubos de tiempo.

En general, su mecánica siempre implicará cinco pasos fundamentales, aunque la forma de desarrollar las tres primeras fases puede variar en función de las características del caso:

- Determinación de las cargas generadas por los pedidos planificados en cada Centro de Trabajo.
- Periodificación de las mismas a lo largo del tiempo de suministro.
- Inclusión de la carga generada por las recepciones programadas.
- Determinación de la Capacidad Necesaria por período en cada Centro de Trabajo.
- Comparación con la Capacidad Disponible y determinación de desviaciones.

5.4.1. Procedimiento simplificado

En este caso, la determinación de cargas se realiza multiplicando los pedidos por los tiempos de carga unitarios, tc_{ijk}, en cada CT_k. Seguidamente, éstas se reparten, con un criterio prefijado (que debe ser realista) entre los diferentes períodos abarcados por el tiempo de suministro (ver Ejemplo 5.1 (continuación)). Dado que los tc_{ijk} se calculan para un tamaño medio del lote (ver Apartado 2.A.5), los pedidos reales no deberían diferir mucho de este último o, en caso contrario, el tiempo de preparación de las operaciones que requiere debería ser pequeño.

EJEMPLO 5.1 (continuación). Procedimiento simplificado de CRP

Para ver cómo se actuaría vamos a apoyarnos en la Tabla 5.7. En el sector superior de la misma hemos colocado los pedidos planificados del Plan de Materiales para los cuatro items fabricados. Se comenzaría por determinar el tiempo de carga unitario de cada ítem j en cada centro de trabajo (TC_{jk}), que, para el caso de existencia de defectuosas, se calcularía de acuerdo con la expresión (ver 2.A.5):

$$TC_{jk} = \sum_{i=n}^{m} tc_{ijk}/v_i \qquad [1]$$

Si la aplicamos, por ejemplo a P1 en CT_2, tendríamos para cada unidad «buena» (ver valores en la Tabla 5.1):

$$TC_{P12} = \sum_{i=1}^{3} tc_{iP12}/v_i = tc_{1P12}/v_1 + tc_{2P12}/v_2 + tc_{3P12}/v_3 =$$

$$= 0 + 0{,}022/0{,}9604 + 0 = 0{,}023 \text{ h.e.}$$ (resaltado en Tabla 5.7)

Los distintos TC_{jk} se calculan de forma análoga y aparecen en la correspondiente columna de la Tabla 5.7. En dicha tabla, para realizar los cálculos con mayor comodidad, hemos colocado sendas columnas para los lotes emitidos (Q_e, que corresponden a los datos del primer sector de la tabla) y para los aprovechamientos de las rutas de cada ítem (de la Tabla 5.4). Para calcular la carga en un *CTk* correspondiente a un pedido planificado concreto (lote a emitir, Q_e) habría que multiplicar a éste por el correspondiente TC_{jk} (carga por unidad «buena») y por el aprovechamiento de su ruta, A_j (ver Apartado 2.A.5, expresión [4']). Así, por ejemplo, el lote de 186 unidades de P1, a emitir a finales de la semana 1 (final del día 5) en el CT3, sería: $TC_{P13} \times 186 \times A_{P1} = 0{,}129 \times 186 \times 0{,}9124 = 21{,}9$ h.e. aproximadamente.

Ahora bien, estas 21,9 unidades han de ser distribuidas a lo largo del tiempo de suministro (dos semanas para P1). Supuesto que es aceptable un reparto uniforme, y dado que el lote se emite al final de la semana 1 y su fecha de recepción planificada es el final de la semana 3 (ver Tabla 5.6), se asignarán 21,9/2 = 10,95 h.e. de carga a la semana 2 y otras tantas a la semana 3 (resaltados en la Tabla 5.7). Repitiendo este proceso para

[7] Aunque hoy es una denominación utilizada por todos los autores, durante algún tiempo recibió otros nombres (ver, por ejemplo, Belt (1976, pág. 9) o Wemmerlöv (1980, pág. 85)).

Tabla 5.7. Cargas generadas en los Centros de Trabajo por los Pedidos Planificados

Conceptos \ Períodos					1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
(1)	Pedidos Planificados de P1				186		186		186		186		186			
(2)	Pedidos Planificados de P2					113		113		113	113		113	113		
(3)	Pedidos Planificados de 112				135	222	135	357		357	135					
(4)	Pedidos Planificados de 121					264		264	264		264	264				
	Item (*i*)	TC*jk*	*Qe*	*Aj*												
CT1	P1	0	Fila (1)	0,9124												
CT1	P2	0	Fila (2)	0,8845												
CT1	112	0,187	Fila (3)	0,8381		7,05	18,65	25,7	37,3	25,7	37,3	25,7	25,7	7,05		
CT1	121	0,026	Fila (4)	0,855			2,9	2,9	2,9	5,8	2,9	2,9	5,8	2,9		
CT1	TOTAL					7,05	21,55	28,6	40,2	31,5	40,2	28,6	31,5	9,95		
	Item (*i*)	TC*jk*	*Qe*	*Aj*												
CT2	P1	0,023	Fila (1)	0,9124		1,95	1,95	1,95	1,95	1,95	1,95	1,95	1,95	1,95	1,95	
CT2	P2	0,055	Fila (2)	0,8845			2,75	2,75	2,75	2,75	2,75	5,5	2,75	2,75	5,5	2,75
CT2	112	0,096	Fila (3)	0,8381		3,62	9,57	13,19	19,14	13,19	19,14	13,19	13,19	3,62		
CT2	121	0,043	Fila (4)	0,855			4,85	4,85	4,85	9,7	4,85	4,85	9,7	4,85		
CT2	TOTAL					5,57	19,12	22,74	28,69	27,59	28,69	25,49	27,59	13,17	7,45	2,75
	Item (*i*)	TC*jk*	*Qe*	*Aj*												
CT3	P1	0,129	Fila (1)	0,9124		10,95	10,95	10,95	10,95	10,95	1095	10,95	10,95	10,95	10,95	
CT3	P2	0,122	Fila (2)	0,8845			6,1	6,1	6,1	6,1	6,1	12,2	6,1	6,1	12,2	6,1
CT3	112	0	Fila (3)	0,8381												
CT3	121	0	Fila (4)	0,855												
CT3	TOTAL					10,95	17,05	17,05	17,05	17,05	17,05	23,15	17,05	17,05	23,15	6,1

cada lote planificado de cada ítem, y acumulando los resultados obtenidos en cada CT dentro de cada período para los distintos lotes, obtendremos las cuatro primeras filas de cada uno de los tres sectores inferiores de la tabla (una fila por ítem y un sector por CT).

Así, si tomamos como ejemplo el ítem 112 (cuyo tiempo de suministro es de tres semanas) en el CT1, tendríamos (resultados resaltados en la Tabla 5.7):

- Un lote de 135 unidades, a emitir al final del período 1, que generará una carga unitaria de 0,187 × × 135 × 0,8381 = 21,16 h.e., que implican 7,05 h.e. en los períodos 2, 3 y 4.
- Un lote de 222 unidades, a emitir al final del período 2, que generará 0,187 × 222 × 0,8381 = 34,8 h.e., lo que implica 11,6 h.e. en los períodos 3, 4 y 5. Por tanto, en el período 3 tendremos 11,6 h.e. de carga por este lote más 7,05 por el lote anterior, es decir, 18,65 h.e.
- Un lote de 135 unidades a emitir al final del período 3, que generará 7,05 h.e. en las semanas 4, 5 y 6.

Así pues, en la semana 4 tendremos una carga de 25,7 h.e., procedente de la carga de los tres lotes mencionados (7,05 + 11,6 + 7,05).

Para considerar todas las cargas, se hace necesario, además, incluir las recepciones programadas, cuyo estado de avance actual se encuentra recogido en el Informe de Producción (ver Tabla 5.3). Las cargas periodificadas que provocan se encuentran detalladas en la Tabla 5.8. Para establecerlas se procede de forma similar que con los pedidos planificados, a excepción de la operación en ejecución. Para esta última, la carga a generar será la que le reste según el mencionado informe, que se asignará por completo al primer período. Para las demás, ahora no podremos considerar el TC_{jk} (dado que parte de las operaciones pueden estar realizadas); debido a ello tendremos que obtener la carga generada por cada operación por separado (multiplicando las cantidades por los tc_{ijk}/v_j). Estas se distribuirán uniformemente entre los períodos que restan hasta la fecha de entrega planificada. Además, dado que se trata del número de unidades a obtener (sólo unidades buenas), no tendrán que ser multiplicadas por A_j.

Así, en el pedido de 100 unidades de P2 a recibir a finales de la semana 2, tendremos:

- Para la terminación de la operación en curso (la O4), quedan cuatro horas, que se asignan al período 1 en el CT3, que es donde se realiza.
- Para concluir el pedido faltan las operaciones 5 y 6.
- La operación 5 genera una carga de tc_{5P22}/v_5 h.e. por unidad a obtener en el CT2; para 100 unidades, tendremos: $(tc_{5P22}/v_5) \times 100 = (0{,}051/0{,}931) \times \times 100 = 5{,}5$ aproximadamente. Estas se distribuirán a lo largo del tiempo que resta hasta la entrega (dos semanas), planificada al final de la semana 2. Por tanto, la carga se repartirá entre las semanas 1 y 2, correspondiendo a cada una 2,75 h.e.
- La operación 6 genera una carga de tc_{6P23}/v_6 h.e. por unidad a obtener en CT3. Para 100 unidades tendremos: $(tc_{6P23}/v_6) \times 100 = (0{,}018/0{,}98) \times 100 \approx 1{,}84$ (aproximadamente), las cuales, distribuidas durante el tiempo que resta hasta la entrega del lote, implicarán 0,92 h.e. en la semana 1 y otras tantas en la 2.

Los resultados acumulados aparecen resaltados en la Tabla 5.8.

Tabla 5.8. Carga generada en los Centros de Trabajo por los Pedidos en Curso

Períodos		1	2	3
P1	Pedidos en curso	170		
	Carga en CT1			
	Carga en CT2			
	Carga en CT3	3		
P2	Pedidos en curso		100	
	Carga en CT1			
	Carga en CT2	2,75	2,75	
	Carga en CT3	4,92	0,92	
112	Pedidos en curso		113	186
	Carga en CT1	11,55	9,75	5,1
	Carga en CT2	6,93	5,93	5,93
	Carga en CT3			
121	Pedidos en curso		226	
	Carga en CT1	2,9	2,9	
	Carga en CT2	8		
	Carga en CT3			

Una vez conocidas las cargas por los pedidos en curso, se sumarán, por período y CT, a las que se calcularon para el Plan de Pedidos para cada ítem (Tabla 5.7), obteniendo las cantidades que aparecen en la Tabla 5.9 (filas 1, 2, 3 y 4 de cada CT). A continuación se acumularán, por período, las cargas generadas por los pedidos de los diferentes ítems dentro de cada CT (fila quinta del sector de cada CT), obteniéndose así el Plan de Carga en cada uno de ellos. Por último, se colocará en la sexta fila de cada CT la Capacidad Semanal Disponible en horas estándar (capacidad diaria de la Tabla 5.2 en horas estándar, multiplicada por cinco días laborables), calculando la desviación mediante la diferencia entre ésta y el Plan de Carga para cada período.

Tabla 5.9. Plan CRP obtenido mediante el procedimiento simplificado

Conceptos		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
CT1	Carga por P1												
	Carga por P2												
	Carga por 112	11,55	16,8	23,75	25,7	37,3	25,7	37,3	25,7	25,7	7,05		
	Carga por 121	2,9	2,9	2,9	2,9	2,9	5,8	2,9	2,9	5,8	2,9		
	Carga total en CT1 (A)	14,45	19,7	26,65	28,6	40,2	31,5	40,2	28,6	31,5	9,95		
	Capacidad disponible (B)	40,8	40,8	40,8	40,8	40,8	40,8	40,8	40,8	40,8	40,8	40,8	40,8
	Desviación (B-A)	26,35	21,1	14,15	12,2	0,6	9,3	0,6	12,2	9,3	30,85	40,8	40,8
CT2	Carga por P1		1,95	1,95	1,95	1,95	1,95	1,95	1,95	1,95	1,95	1,95	
	Carga por P2	2,75	2,75	2,75	2,75	2,75	2,75	2,75	5,5	2,75	2,75	5,5	2,75
	Carga por 112	6,93	9,55	15,5	13,19	19,14	13,19	19,14	13,19	13,19	3,62		
	Carga por 121	8		4,85	4,85	4,85	9,7	4,85	4,85	9.7	4,85		
	Carga total en CT2 (C)	17,68	14,25	25,05	22,74	28,69	27,59	28,69	25,49	27,59	13,17	7,45	2,75
	Capacidad disponible (D)	32,5	32,5	32,5	32,5	32,5	32,5	32,5	32,5	32,5	32,5	32,5	32,5
	Desviación (D-C)	14,82	18,25	7,45	9,76	3,81	4,91	3,81	7,01	4,91	19,33	25,05	29,75
CT3	Carga por P1	3	10,95	10,95	10,95	10,95	10,95	10,95	10,95	10,95	10,95	10,95	
	Carga por P2	4,92	0,92	6,1	6,1	6,1	6,1	6,1	12,2	6,1	6,1	12,2	6,1
	Carga por 112												
	Carga por 121												
	Carga total en CT1 (E)	7,92	11,87	17,05	17,05	17,05	17,05	17,05	23,15	17,05	17,05	23,15	6,1
	Capacidad disponible (F)	27,25	27,25	27,25	27,25	27,25	27,25	27,25	27,25	27,25	27,25	27,25	27,25
	Desviación (F-E)	19,33	15,38	10,2	10,2	10,2	10,2	10,2	4,1	10,2	10,2	4,1	21,15

Como ya indicamos anteriormente, este procedimiento sólo producirá resultados satisfactorios si se cumplen las condiciones citadas en el primer párrafo del apartado. Si, por el contrario, éstas no se dieran, el Plan de Capacidad obtenido se desviaría de las cargas reales producidas por los pedidos planificados y en curso. No obstante, dado que esta opción requiere mucho menos tiempo de computación que el procedimiento detallado (ver Apéndice 5.A), es contemplada por muchos paquetes de software MRP II (incluso hay algunos que lo simplifican más aún, al ignorar la influencia de los ítems defectuosos sobre la carga generada por los lotes planificados en los Centros de Trabajo).

5.4.2. Procedimiento detallado

El procedimiento CRP detallado pretende distinguir, desde el comienzo, las cargas generadas por las diferentes operaciones de cada lote. El objeto es establecer, posteriormente, los momentos de comienzo y fin de cada una de ellas a lo largo del tiempo de suministro, teniendo en cuenta la secuencia de acontecimientos que lo componen. Además, para evitar el problema de los tamaños de lote variable, diferencia entre la carga por tiempo de preparación (tp_{ik}) y ejecución (te_{ik}) de cada operación (i). En este caso, pues, no podrán emplearse los TC_{jk} calculados, sino que habrá que operar con sus componentes, es decir, si antes se utilizaba la expresión [1]:

$$TC_{jk} = \sum_{i=n}^{m} tc_{ijk}/v_i \quad [1] \qquad \text{donde} \qquad tc_{ijk} = te_i + tp_{ik} \times v_i/\mu \times A_j{}^{8} \quad [2]$$

siendo μ (lote medio a emitir del ítem j), ahora se distinguirá, para cada operación, i:

- El tp_{ik} (en h.e.), que, al considerarse independiente del lote, no se verá afectado por las defectuosas (por ello, en la expresión [2] se le multiplica por v_i, pues al introducirlo en [1] desaparecerá dicho factor).
- El te_i (en h.e.). Como este tiempo se produce cada vez que se realiza la operación, la determinación de la carga por unidad «buena» implicará seguir dividiéndolo por v_i, al objeto de considerar las defectuosas. Además, será necesario multiplicarlo por el tamaño del lote a fabricar.

Así pues, un lote cualquiera (Q_j) a obtener (unidades «buenas») del ítem j, provocará, por la operación i de su ruta, en el correspondiente CT, una carga igual a: $tp_{ik} + (te_i/v_i) \times Q_j$.

Si se trata de calcular la carga del correspondiente lote a emitir de j (pedido planificado, $Q_{ej} = Q_j/A_j$), la carga provocada sería: $tp_{ik} + (te_i/v_i)\ (Q_j/A_i)$.

En el Apéndice 5.A se resuelve el caso del Ejemplo 5.1 mediante el procedimiento detallado.

5.4.3. Conclusiones a la técnica CRP

Tras lo expuesto en el presente apartado (ver también Apéndice 5.A), resulta claro que CRP es la técnica que ofrece el Plan de Carga más detallado de cuantas

[8] tp_{ik} no se verá afectado por A_j puesto que habrá que emplear la expresión [4] (Apartado 2.A.5) al calcular la carga de un lote y, en ella, A_j aparece multiplicando.

hemos analizado hasta aquí, eliminando los inconvenientes señalados para las técnicas CPOF, Listas de Capacidad y Perfiles de Recursos. Sin embargo, tiene la desventaja de necesitar mucha información y de utilizar un largo proceso de cálculo. Debido a ello, es imprescindible el uso del ordenador para llevarlo a la práctica y, por supuesto, contar con un sistema MRP instalado. Pero, aun así, el tiempo de computación requerido es mucho, siendo, además, muy difícil apreciar qué pedidos generan las sobrecargas.

Como consecuencia de todo ello, el proceso de prueba y error, necesario para llegar a un Plan de Pedidos viable mediante CRP, no puede incluir muchas simulaciones, pues ello implicaría un coste y una lentitud excesivos. Es este inconveniente el que ha hecho que muchos paquetes de software MRP II incorporen procedimientos simplificados. El proceso a desarrollar con CRP será mucho más corto si se parte de un PMP viable desde el punto de vista de la capacidad, lo cual traería consigo menor necesidad de ajustes al desarrollar CRP.

5.5. CALCULO DE COSTES

De entre los distintos sistemas existentes en la actualidad, el más comúnmente empleado por MRP II es el Sistema de Costes Estándar para las funciones de cálculo, recálculo y simulación. Estos costes tienen las siguientes características (Sáez y Gutiérrez, 1992, pág. 403):

- Son calculados previamente a partir de condiciones de trabajo consideradas como posibles y deseables.
- Constituyen un coste de referencia con el que se comparan las realizaciones efectivas de la actividad.
- Son preestablecidos (se calculan antes de comenzar las operaciones de producción y venta).

No vamos a analizar en profundidad la problemática general de este tipo de sistemas, para lo cual nos remitimos a algunas de las múltiples obras que tratan el tema. Nos limitaremos simplemente a hacer algunos comentarios relativos a su utilización en el contexto que nos ocupa. Los sistemas MRP II diferencian, como mínimo, entre *costes de materiales y de mano de obra* (costes directos), incluyendo el resto en un apartado de *costes generales* (costes indirectos), a los cuales subdividiremos en tres grandes grupos: costes indirectos de fabricación variables (energía, mantenimiento, etc.), costes indirectos de fabricación fijos y otros costes indirectos (publicidad, administración, etc.)[9]. El problema básico está en la determinación de los criterios de reparto de los costes. La imputación del coste de materiales es la más clara y se hace directamente al ítem en el que se emplea, en una cantidad derivada de la Lista de Materiales y a un precio muchas veces acordado por contrato con el proveedor (ello hace posible determinar con exactitud la parte del coste del ítem debida a este concepto).

Los *costes de mano de obra y los costes indirectos de fabricación variables* (energía, mantenimiento, etc.), van normalmente asociados a los tiempos de funcionamiento de los centros de trabajo. Por lo que respecta a los *costes indirectos de fabricación fijos*, los criterios de reparto pueden ser múltiples. Por nuestra parte, vamos a distribuirlos indirectamente a través de los CT para, posterior-

[9] Sin embargo, puede llegarse a subdivisiones más precisas en función de las necesidades de cada caso (por ejemplo, costes de subcontratación, diferentes tipos de mano de obra, máquinas, etc.).

mente, repartirlos por h.e. en cada CT en función de la carga planificada por CRP para el horizonte considerado. La asignación a cada ítem se hará en función del consumo de carga que realice en cada uno de ellos. Por último, será necesario asignar los *otros costes indirectos* (tales como publicidad, administración, etc.); una posibilidad sería repartir los de un cierto período entre las unidades a fabricar durante el mismo. Sin embargo, esto complicaría mucho la determinación del coste para los items componentes (que pueden ser, para cada producto, de muy diferentes características). Por ello, el método más utilizado es la determinación del coste general por h.e. en cada CT (coste total general para el CT/número de h.e. de trabajo del CT durante el horizonte de planificación (HP)), aplicando posteriormente dicho valor a los distintos items en función de su tiempo de ejecución unitario.

EJEMPLO 5.1 (continuación). Determinación simplificada de planes agregados

Por lo que a nuestro ejemplo se refiere, los datos de costes que hemos supuesto aparecen en la Tabla 5.10. Los costes fijos de fabricación y los generales por h.e. de cada CT, se determinan dividiendo los correspondientes costes previstos durante el HP en cada uno de ellos, por el total de carga prevista en el Plan CRP desarrollado (ver Tabla 5.9).

En cuanto al coste de los elementos adquiridos en el exterior, éstos son: 650 u.m./unidad del 111, 250 u.m./unidad del 211 y 420 u.m./unidad del 212 (ver Tabla 5.12).

A partir de aquí, se determinará el coste unitario para cada operación, multiplicando el tiempo de carga unitario (tc_{ijk} de la Tabla 5.1) por los costes por h.e. de cada tipo en su CT correspondiente. Así, para cada operación de las rutas 1 y 3, los resultados correspondientes aparecen en la Tabla 5.11.

A continuación se calcularán los costes unitarios para cada lista de materiales. Por ejemplo, para P1, el proceso sería el que se describe a continuación (ver Tabla 5.12).

Se comenzará por los items comprados (nivel 2 de su LM (Figura 5.1): 111, 211 y 212), que sólo tendrán coste de materiales. A continuación se pasará al nivel 1, donde sólo aparece el ítem 112, que se obtiene a partir de una unidad del 211 y dos del 212. Su coste de materiales se determinará teniendo en cuenta que hay una cierta cantidad de desechos, por lo que habrá que tener en cuenta el factor de aprovechamiento, A112 = 0,8381 (Tabla 5.4). Así, por cada unidad de 112, necesitaremos 1,193 unidades de 211 (1/0,8381) y 2,386 unidades de 212 (2/0,8381), que, multiplicadas por sus respectivos costes medios, nos llevarán al coste unitario de materiales del ítem 112: 250 × 1,193 + 420 × 2,386 = 1.300.

Además, dicho ítem requiere las operaciones 7, 8 y 9 (ver ruta en Figura 5.3), cuyos costes unitarios se encuentran en la Tabla 5.11. Cada operación i deberá ser efectuada $1/v_i$ veces (ver Tabla 5.1), por lo que el coste que generan habrá que multiplicarlo por dicho factor. Así, para la operación 7, sus distintos costes unitarios deberán dividirse por v_7 (0,8381, en la Tabla 5.1): coste mano de obra = 158,4 : 0,8381 = 189; costes indirectos de fabricación variables = 398,2 : 0,8381 = 457,1; costes indirectos de fabricación fijos = 648,6 : 0,8381 = 773,9; otros costes indirectos = 1.945,8 : 0,8381 = 2.321,7.

Actuando igual para el resto de las operaciones del ítem 112 y para P1, obtendremos los costes que aparecen en la Tabla 5.12.

Una vez en la fase de ejecución, se determinarían periódicamente las divergencias entre los estándares calculados y los costes reales, proceso consustancial con todo sistema de costes estándar, pues permitiría buscar y corregir las causas de dichas discrepancias.

Tabla 5.10. Datos de costes por CT

Concepto \ CTk	CT1	CT2	CT3
Coste Mano Obra/h.e.	1.800	1.400	1.500
Coste Indirecto Fabricación Variable/h.e.	4.525	3.628	2.530
Coste Indirecto Fabricación Fijo en HP	2.000.000	2.000.000	1.000.000
Otros Costes Indirectos en HP	6.000.000	4.000.000	3.000.000
Carga total	271,35	241,14	191,54
Coste Indirecto Fabricación Fijo/h.e.	7.370,5	8.294	5.221
Otros Costes Indirectos/h.e.	22.111,5	16.588	15.662,5

Tabla 5.11. Datos de costes para las operaciones de las rutas 1 y 3

Concepto \ Operaciones	O1	O2	O3	O7	O8	O9
CTk	3	2	3	1	2	1
Carga/unidad	0,089	0,022	0,031	0,088	0,089	0,079
Coste Mano de Obra/unidad	133,5	30,8	46,5	158,4	124,6	142,2
Coste Indirecto Fabricación Variable/unidad	225,2	79,8	78,4	398,2	322,9	357,5
Coste Indirecto Fabricación Fijo/unidad	464,7	182,5	161,8	648,6	738,2	582,3
Coste General/unidad	1.393,9	364,9	485,5	1.945,8	1.476,3	1.746,8

Tabla 5.12. Determinación de costes unitarios de los items de P1

	Nivel	Items		Material	Mano de obra	Coste Indirecto Fabricación Variable	Coste Indirecto Fabricación Fijo	Otros costes Indirectos	Coste total unitario
P1	2	*111*	— Coste (comprado) — *Coste Unitario*	650 650	0	0	0	0	650
		211	— Coste (comprado) — *Coste Unitario*	250 250	0	0	0	0	250
		212	— Coste (comprado) — *Coste Unitario*	420 420	0	0	0	0	420
	1	*112*	— Coste 211/A_{112} — Coste 212 × 2/A_{112} — Coste 07 — Coste 08 — Coste 09 — *Coste Unitario*	298 1.002 — — — 1.300	— — 189 133,8 148,1 470,9	— — 475,1 346,7 372,4 1.194,2	— — 773,9 792,7 606,6 2.173,2	— — 2.321,7 1.585,37 1.819,6 5.726,67	— — — — — 10.865
	0	*P1*	— Coste 112/A_{P1} — Coste 111 × 2/A_{P1} — Coste 01 — Coste 02 — Coste 03 — *Coste unitario*	1.424,8 1.424,8 — — — 2.849,6	516,1 — 146,3 32,1 47,4 741,9	1.308,9 — 246,8 83,1 80 1.718,8	2.381,9 — 509,3 190 165,1 3.246,3	6.276,5 — 1.527,7 379,9 495,4 8.679,5	— — — — — 17.236,1

Antes de terminar diremos que el sistema MRP II acepta la distribución de costes mencionados sin entrar en si es o no correcta, por lo que habría que cerciorarse previamente de la calidad de los citados *inputs*. Por otra parte, hay que resaltar que no hemos entrado en la problemática de la determinación de los costes, por considerar que ello es más propio del área contable. Sólo mencionaremos que el actual desarrollo tecnológico (ver J. A. D. Machuca y otros, Capítulos 10 a 12) ha hecho que los costes generales puedan tener un valor varias veces

superior al de los costes directos; en dicho contexto, la forma tradicional de determinación de los primeros ha quedado obsoleta. El método de «costes basados en la actividad» (*Activity Based Costing*) ha sido desarrollado para hacer frente al problema mencionado y puede ser empleado en conjunción con el sistema de costes estándar al que hemos hecho referencia (ver Scott, 1994, Apartado 25.9).

5.6. FUNCIONES DEL SISTEMA

Las distintas funciones desarrolladas por el Sistema MRP II han ido apareciendo de forma implícita o explícita en las páginas anteriores. No resta más que clasificarlas y describirlas brevemente, para lo cual las reuniremos en dos grandes grupos: directas e indirectas.

Las primeras son aquellas que el MRP II desarrolla en los procesos y transacciones realizadas por el sistema. Las segundas encuadran aquellas otras que muestran el efecto de las funciones directas sobre otras áreas de la empresa. El Cuadro 5.2 resume las principales.

Cuadro 5.2. Principales funciones desarrolladas por el sistema MRP II

A. FUNCIONES DIRECTAS

A.1. Formalización informatizada del proceso de planificación empresarial (ver Capítulo 1). Desarrolla la parte mecánica de éste y proporciona a los decisores información para la valoración y selección de las alternativas.

A.2. Elaboración de planes a largo y medio plazo. El Sistema MRP II concreta su participación en la planificación estratégica de la empresa, tanto en el desarrollo del Plan de Empresa como en la validación del Plan de Producción a largo plazo (a través de la del Plan Agregado), en términos de capacidad y en la simulación de diversas alternativas como apoyo a las decisiones empresariales. Además, desarrolla el Plan Agregado de producción a medio plazo.

A.3. Cálculo de costes. El Sistema MRP II permite la determinación de los costes estándar unitarios, tanto de operaciones y centros de trabajo como de los distintos items. También admite la actualización inmediata de estos costes ante cambios en los precios, en las cantidades de los *inputs* utilizados, o en las previsiones de costes. Admite otros sistemas de costes.

A.4. Programación maestra de la producción. MRP II desarrolla la conversión del Plan de Producción en Programa Maestro de Producción para la planificación operativa, permitiendo, además, determinar la viabilidad del mismo en términos de capacidad.

A.5. Planificación y control de la capacidad a medio, corto y muy corto plazo: RRP, RCCP, CRP, *Input/output* (ver Capítulos 2 y 9). Permite establecer la validez de los Planes de Producción. Además, el análisis *Input/Output* proporciona información crucial para la adopción de medidas correctoras de los elementos determinantes del Sistema de Planificación y Control de la Capacidad.

A.6. Gestión de Inventarios. MRP II permite el desarrollo de una Gestión de Stocks (ver Capítulo 13), dado que mantiene los registros de inventarios (bajas, altas y modificaciones) y permite la determinación del tamaño óptimo del lote para los items que se desee.

A.7. Planificación de las necesidades de materiales. Como ya hemos expresado en múltiples ocasiones, MRP II está construido alrededor del modelo MRP, por lo que incluye las funciones de éste (ver Capítulo 4).

A.8. Programación de Proveedores. Dichos programas podrán ser enviados directamente a aquéllos, incluso por medios informáticos (EDI, ver Cuadro 4.2). Ello elimina gran parte del trabajo administrativo, reportando grandes beneficios a la actividad de compras.

A.9. Presupuestación. Puede elaborar presupuestos de compras, de ventas y de inventarios proyectados, que son fundamentales en cualquier empresa industrial. Para el primero partirá de los programas de proveedores, para el segundo del Plan de Ventas, y para el tercero del Plan de Pedidos y de carga CRP (todo ello valorado en unidades monetarias). Se sigue manteniendo, por tanto, la integración entre todos los planes, de forma que el cumplimiento de los de nivel inferior implicará el de los de niveles superiores.

A.10. Gestión de Talleres. MRP II aconseja los pedidos a emitir al taller en función de sus fechas de emisión y entrega planificadas, así como del informe de producción. Ello le permite establecer las prioridades entre pedidos y establecer programas de operaciones con la lista de expedición, o mediante cualquier otra técnica de secuenciación que se pudiera emplear en función del caso (ver Capítulo 9).

A.11. Simulador de la actividad empresarial. En MRP II, la capacidad de simulación acoge a la mayoría de áreas de la empresa. Permite simular desde los efectos del cambio de un componente en el coste final de un ítem, hasta los de un cambio en las ventas previstas o en un objetivo sobre la capacidad, materiales o inventarios futuros, pasando por el efecto en la producción del retraso de un pedido de un proveedor o de la avería de una máquina. Las posibilidades de simulación de MRP II son amplísimas, involucrando a las distintas áreas de la firma; pueden abarcar a todas las funciones antes mencionadas, lo cual permitirá determinar la consecuencia de cualquier cambio en el resto de ellas, o incluso determinar el efecto de diversas situaciones alternativas de cara a la toma de decisiones.

B. FUNCIONES INDIRECTAS

B.1. Apoyo a la fijación de objetivos, estrategias y políticas. La elaboración por MRP II de los planes a largo y medio plazo permitirán a la Alta Dirección la comprobación de la validez de los objetivos, estrategias y políticas trazados. Además, la posibilidad de simular los efectos de planes alternativos permitirá determinar las correcciones que se juzguen convenientes.

B.2. Información básica para la toma de decisiones. En este punto habría que destacar dos aportaciones básicas: la de las salidas MRP II y la de su capacidad de simulación. Las primeras abarcan un gran abanico de aspectos empresariales y, por sí solas, aportan información válida para la toma de decisiones en todos ellos. La segunda incrementa dicho potencial, pues permitirá lograr importante información en situaciones de futuro probable o incierto.

B.3. Informacion básica al Subsistema Comercial. La posibilidad de determinar las fechas de entrega de pedidos (pedidos planificados de items finales), de conocer las entregas a realizar en determinado período a los clientes en cartera, etc., serán de gran ayuda para la programación de la distribución física, la consecución de altos niveles de servicio, etc.

B.4. Información básica a Contabilidad y Finanzas. Son consecuencia de las funciones que, en costes y presupuestación, desarrolla el Sistema. Ahora Finanzas conoce los inventarios proyectados, los ingresos y compras planificadas no procedentes de sus propias previsiones (proceso clásico, que rompe la integración de la Gestión Empresarial), sino obtenidos a partir de la planificación realizada para las actividades que los originan. Qué duda cabe que todo ello facilitará la planificación financiera, sobre todo en el corto plazo.

5.7. SALIDAS DEL SISTEMA

La variedad de características de los sistemas implantados y del software existente en el mercado, hacen casi imposible establecer una lista exhaustiva de las posibles salidas. Estas varían mucho en forma, criterios de ordenación, número, etc. Ello las transforma en uno de los criterios importantes en la elección de un software adecuado por parte de la empresa que desee implementarlo. El Cuadro 5.3 resume las salidas básicas dentro de cada una de las funciones del Sistema, a excepción de las ya originadas por el Sistema MRP originario, que fueron comentadas en el capítulo anterior.

Cuadro 5.3 Salidas básicas de un Sistema MRP II

A) **Para la planificación a medio y largo plazo.** Diversos informes sobre el Plan de Empresa, las previsiones de ventas, el Plan de Ventas, Plan Agregado de Producción, etc., así como de las desviaciones que se van produciendo.

B) **Sobre costes.** Costes unitarios y reales de un ítem o de un CT; costes estándar y reales globales de un pedido o de un CT. Estos informes suelen desagregarse en los diferentes conceptos de coste y pueden mostrar las desviaciones entre coste real y estándar.

C) **Para la programación de proveedores y presupuesto de compras.** Básicamente expresarán el comportamiento pasado de los proveedores, los programas de pedidos de éstos últimos y los pedidos a proveedores por items. También incluirán el presupuesto de compras.

D) **Sobre el presupuesto de ventas y a los inventarios proyectados.** Incluirán, sobre todo, los resultados de las actividades desarrolladas por el Sistema en este campo: presupuesto de ventas, informe de valoración del inventario actual y del resultante de la planificación (a coste estándar y real), etc., tanto globales como clasificados por items o conceptos (productos finales, producción en proceso, etc.).

E) **Sobre la programación maestra.** Recoge toda la información empleada para la obtención del PMP (pedidos de clientes, previsiones de ventas, disponibilidades y pedidos en curso de items finales), así como el contenido de aquél. Suelen incluir informes de cambios y desviaciones del PMP.

F) **Sobre la gestión de capacidad.** Entre ellos:
- Informe de Cargas planificadas por RRP.
- Informe de cargas derivadas del PMP por la Planificación de Capacidad *Rough-Cut*, en el que se muestra, por período, una comparación entre la capacidad disponible y la necesidad de capacidad planificada, así como la sobrecarga o subcarga resultante.
- Informe del Plan de Carga elaborado por CRP.
- Diagrama de carga por CT, según el Plan CRP.
- Informe de sobrecargas y subcargas con respecto a la capacidad disponible, según el programa de operaciones, para cada centro de trabajo.
- Informe *Input-Output*
- Informe de eficiencia en la producción, especificando la actividad por operario.

G) **Sobre la gestión de talleres.** Abarcan toda la información resultante del procesamiento de pedidos en los CT, así como la necesaria para la actividad del programador. La primera es muy amplia, pues recoge múltiples opciones de informes sobre pedidos emitidos y planificados a taller (tanto por items como por CT) bajo muy diferentes ordenaciones y condiciones (por ejemplo, pedidos en fecha crítica, pedidos que ya han rebasado su fecha de entrega planificada, pedidos que necesitan más tiempo para su culminación que el previsto hasta la fecha de entrega, pedidos emitidos con retraso, operaciones en curso de cada ítem en cada CT, tiempo restante de cada pedido en proceso o evolución de las colas de espera). El segundo tipo de información también comprende un amplio abanico de informes, que van desde la elaboración de la documentación del paquete del pedido, hasta informaciones puntuales sobre las necesidades y disponibilidades de items componentes para un pedido cualquiera.

H) **Sobre la función de compras.** También muy numerosos, permiten obtener información sobre la situación de los pedidos en curso de un ítem o un proveedor, las características de éstos últimos y su comportamiento pasado, los pedidos próximos, las recepciones previstas, las compras planificadas y pasadas, o datos acumulados sobre las adquisiciones de un ítem o un proveedor. Además suelen proporcionar la documentación del pedido para remitirla al proveedor.

I) **Otras salidas.** Básicamente se incluyen aquí los listados de cualquiera de los diferentes registros de la base de datos con diversas ordenaciones (por ejemplo: calendario de taller, de rutas de items, de centros de trabajo, etc.), así como las informaciones derivadas de las transacciones (mensajes de error, mensaje de inventario disponible insuficiente, etc.).

5.8. VENTAJAS E INCONVENIENTES

Una vez analizados los aspectos fundamentales de los sistemas MRP, es paso obligado hacer referencia a las ventajas e inconvenientes que conllevan con objeto dar una visión completa sobre los mismos. Desde que vio la luz la primera publicación en la que se hablaba de *Materials Requirements Planning* hasta hoy, los resultados obtenidos han sido uno de los elementos más analizados. Ello ha permitido contar con bastante información, tanto sobre la técnica en sí como sobre el entorno en que se va a introducir.

5.8.1. Ventajas fundamentales

Los beneficios que un Sistema MRP II puede aportar a la empresa que lo implementa con éxito son importantes y variados, pudiendo ponerla en una situación competitiva envidiable. Por nuestra parte, los clasificaremos en ocho grandes apartados, teniendo en cuenta que la consecución de cada uno de ellos dependerá del grado de eficiencia de la empresa en el uso del Sistema; serán mayores para empresas tipo A, e irán decreciendo a medida que nos acercamos al tipo D (ver Cuadro 4.1).

5.8.1.1. *Aportaciones a la dirección y gestión de la empresa*

Permite una gestión anticipativa, pues los programas que elabora son desarrollados de forma integrada y están siempre actualizados, permitiendo, además, simular las consecuencias de cualquier evento sobre dichos programas. Por otro lado, la necesidad que establece MRP II de trabajar en equipo por parte de todos los altos cargos de las diferentes áreas facilita la integración, el consenso de criterios y un aunamiento de esfuerzos para alcanzar el mismo objetivo.

5.8.1.2. *Impacto sobre la exactitud de los datos empleados y las informaciones generadas.*

Es difícilmente cuantificable, por lo que nos limitaremos a señalar sus ventajas y el porqué de las mismas:

- El software MRP II cuenta con sistemas muy avanzados de detección de errores en la introducción de datos, así como de salidas para retroalimentación con vistas a determinar divergencias.
- Se emplea una base de datos única en la que éstos se introducen una sola vez y no se duplican las funciones de introducción, manipulación y ensamblaje. Como consecuencia, se reduce el número de empleados dedicados a estas tareas y disminuye la probabilidad de error.
- MRP II obliga a disponer de unos procedimientos claros y detallados, de forma que cualquier persona realice la misma tarea de la misma forma. La consecuencia es que todos los pasos que se dan en el Sistema son perfectamente conocidos y están perfectamente establecidos, con lo que se evitan los fallos derivados del desarrollo incorrecto de las operaciones y, en el caso de que se produzcan, se puede detectar su origen con más facilidad.

5.8.1.3. *Impacto sobre los inventarios*

La clara mejora en la programación (ver Capítulo 4) permite a los sistemas MRP acercarse al objetivo de disponer de los stocks necesarios justo a tiempo, por lo que se eliminan en gran medida los stocks de seguridad y se aumenta la rotación de inventarios. Además, al ser ésta la función originaria de MRP, también es la más experimentada y perfeccionada, por lo que es aquí donde el Sistema presenta sus beneficios más espectaculares. Son muy numerosos los estudios realizados

sobre este punto[10] y se puede hablar de reducciones de la inversión en inventarios de entre el 10 y el 50 por 100. Cuanto más profundas sean las Listas de Materiales, más complejos los procesos de fabricación, mayor el número de productos, etc, mayor será la reducción lograda. Evidentemente, ésta variará también en función del tipo de industria.

5.8.1.4. *Impacto sobre la información y el nivel de servicio a clientes*

Gracias a la capacidad de programación se pueden conocer las fechas de emisión y entrega con mucha antelación, por lo que se puede proporcionar al cliente una fecha prácticamente exacta de entrega de su pedido (simultaneando esto con una disminución del nivel de inventarios). Asimismo, las mejoras en la programación llevan a una disminución del tiempo de suministro al cliente. Los resultados reales reflejan la posibilidad de lograr mejoras de los niveles de servicio del 26 por 100[11] y de las entregas de los pedidos en la fecha prometida desde el 90 (Savage, 1988, pág. 659) hasta el 97 por 100 (Wight, 1982, pág. 20), reduciéndose además los plazos de entrega en una media del 37,7 por 100 (Anderson y otros, 181, pág. 32).

5.8.1.5. *Impacto sobre la productividad del trabajo*

MRP II puede lograr importantes mejoras en la productividad del trabajo, siendo las más importantes las conseguidas en la mano de obra directa (causas: distribución más uniforme de las cargas de trabajo, reducción de la frecuencia de las interrupciones, mejor coordinación entre recepción de materiales y fabricación, mejor programación de la producción, etc.). La cuantía de las mejoras variará con el número de productos fabricados, la complejidad de los procesos, etc. Se puede hablar de incrementos medios de productividad de la mano de obra directa del 5 al 10 por 100 en fabricación, y del 25 al 40 por 100 en ensamblaje (Wight, 1981, pág. 81), lo cual, según estudios realizados, puede traer una reducción del coste de entre el 2 y el 10 por 100 por término medio (Montollonch, 1982, pág. 71). Los testimonios en este punto son bastante numerosos[12].

Además, gracias a la integración de la gestión de las diversas áreas en un sistema computarizado como MRP II, se puede lograr reducir en parte el trabajo administrativo al disminuir la documentación empleada y los pasos de ésta. Los porcentajes de reducción se llegan a cifrar entre el 15 y el 40 por 100 por término medio (Plossl, 1983, pág. 173 y ss.).

5.8.1.6. *Impacto sobre compras*

Reducción del papeleo mantenido por el personal de compras mayor tiempo disponible para comprar, pues, al conocer las necesidades y sus fechas con mayor anticipación, puede negociarse con los proveedores, consiguiendo contratos anuales y comunicándoles las necesidades futuras de la empresa, etc. Todo ello conllevará una reducción del coste de las compras en una cuantía dependiente del caso concreto, aunque las más citadas por los diferentes autores están entre el 5 por 100[13] y el 11 por 100[14].

[10] Ver, por ejemplo, Savage (1988, pág. 659), LaForge-Sturr (1986, pág. 134), White (1986, pág. 24), Anderson y otros (1981, pág. 32) o Oliver Wight Co. (1985, citado en Garvin (1992, pág. 443)).
[11] Oliver Wight Co. (1985, citado en Garvin, 1992, pág. 443).
[12] Ver, por ejemplo, Beddick (1983, págs. 26 a 33), Davenport (1983, pág. 63), Wallace (1985, página 136) o Jarkon-Nanda (1985, pág. 62).
[13] Ver, por ejemplo, Savage (1988, pág. 659), Ruhl (1975, pág. 5) o Schorr (1988, pág. 230).
[14] Oliver Wight Co. (1985, citado en Garvin, 1992, pág. 443).

5.8.1.7. *Impacto sobre los costes de transporte*

Los retrasos y urgencias en el cumplimiento de las fechas de entrega, así como la descoordinación entre producción e inventarios, hacen que se eleven en muchos casos los costes de transporte. La mejora que en ambos puntos consigue MRP II evitará muchas de estas urgencias, logrando reducciones en el coste del transporte de hasta el 15 por 100 (Wight, 1982, pág. 23).

5.8.1.8. *Otras ventajas*

Aun siendo las anteriores las ventajas más claras, no son las únicas. Existen otras, citadas por diferentes autores, de entre las que destacaríamos resumidamente las siguientes:

- Reducción de la obsolescencia y aumento de la productividad del Departamento Técnico.
- Mejora de la posición competitiva de la empresa.
- Mejora del grado de satisfacción de los clientes.
- Mejor control de los inventarios.
- Mejor estimación de los costes.
- Mayor calidad y exactitud de la presupuestación.

El conjunto de ventajas mencionadas tendrá, sin duda, importantes consecuencias sobre el **Beneficio** de la empresa. De hecho, un estudio desarrollado en 1985 sobre 1.123 empresas usuarias de MRP o MRP II[15], reveló que, gracias al Sistema, se consiguieron beneficios superiores a un millón de dólares en el 40 por 100 de los casos de empresas tipo A y en el 23 por 100 de usuarios en general. Asimismo, sólo el 2 por 100 de las empresas tipo A y el 25 por 100 de usuarios en general, declararon beneficios derivados del Sistema inferiores a los 100.000 dólares. Además, existen numerosos testimonios que confirman este aspecto (por ejemplo: Jarkon, director adjunto de Blind Inc., habla de una reducción del coste unitario de su empresa del 16 por 100 entre 1983 y 1985, lo que supondría alrededor de 400.000 dólares (Jarkon-Nanda, 1985, pág. 62)). La implementación exitosa de MRP o MRP II abre, por tanto, las expectativas de lograr un importante efecto económico y un incremento de la ventaja competitiva de la firma.

5.8.2. Inconvenientes fundamentales

Frente a las grandes ventajas que la implementación exitosa de MRP II puede conllevar, también existen importantes inconvenientes. Entre ellos, cabría destacar:

5.8.2.1. *Alto coste*

Es muy difícil establecer un coste medio para la implementación de un Sistema MRP II, dado que éste, en función de múltiples circunstancias, puede tener asociada una dispersión tan grande que el dato no resulte representativo. No obstante, y a título orientativo, digamos que las empresas españolas invirtieron, en 1987, sólo en software MRP, una media de 4.600.000 pesetas, con un máximo de 20.000.000 y un mínimo de 1.500.000[16]. Se incluye ahí una mayoría de softwa-

[15] Oliver Wight Co. (1985, citado en Garvin, 1982, pág. 442 y ss.).
[16] Estudio facilitado por Prodstar España, Barcelona.

re MRP originario o de Bucle Cerrado, lo que hace que la media real sea más baja. Para una empresa mediana o grande el precio del software MRP II superaría los 20 millones. A esto hay que añadir que ésta es sólo una partida del coste total de la implementación, el cual estaría compuesto por:

- Costes en el área técnica: hardware, software, personal de sistemas y proceso de datos (además de los costes de mantenimiento del software y de suministros que acompañan a la implementación de cualquier software).
- Costes en el área de datos: preparación de listas de materiales, de los registros de inventarios, de las rutas y del resto de los *inputs*.
- Costes en el área de personal: equipo del proyecto, formación y entrenamiento, asesoría externa e incrementos de nómina indirectos.

El citado estudio de la Oliver Wight Co. estableció (ver Tabla 5.13) un gasto medio de implementación en Sistemas MRP de 907.000 dólares en 1985, siendo la media de 1.181.000 para usuarios tipo A y de 1.002.000 para usuarios tipo D. Dichas cifras suponen una cuantiosa inversión, pero hay que realizar algunas precisiones al respecto. En primer lugar, la inversión irá en proporción al tamaño y complejidad del caso. Téngase en cuenta que el estudio en cuestión fue realizado sobre empresas de considerable tamaño (sólo el 10 por 100 de las estudiadas tenía un volumen de ventas inferior a 10.000.000 de dólares y el 30 por 100 superaba los 100.000.000). La inversión media resultante puede estar, pues, entre el 1 y el 10 por 100 de la cifra de ventas de dichas empresas; si se considera, además, que esto es una inversión inicial cuyos efectos se prolongan durante muchos años, la cifra no resulta proporcionalmente muy grande. Además, la inversión más cuantiosa es la del hardware y software, que soportan al sistema (casi el 50 por 100 del total), existiendo en el mercado numerosas opciones con gran diversidad de precios. A partir de unos 2.000.000 de pesetas se puede encontrar software para pequeñas y

Inversión en miles de dólares	Inversión media de todos los usuarios	Inversión media de usuarios tipo A
Hardware	257	394
Software	176	175
Exactitud de Registro de Inventarios	52	108
Exactitud de Listas de Materiales	43	52
Exactitud de las Rutas	29	39
Educación	66	97
Consultores	45	48
Otros Costes	239	268
TOTAL	907	1.181

Tabla 5.13. Inversión media de empresas norteamericanas en la implementación de sistemas MRP/MRP II

medianas empresas (al menos en su configuración básica)[17] que incluso funcionan en redes locales de microordenadores. En segundo lugar, las necesidades de personal de sistemas no son mucho mayores que en cualquier otra aplicación informatizada. Además, en las empresas grandes ya suele existir este personal y en las pequeñas se puede optar por la asesoría externa de la casa vendedora del software. En tercer lugar, el coste de la preparación de la base de datos es proporcional a la falta de calidad de la información manejada por la empresa. Si ésta es mala, el coste será alto, pero es evidente que las informaciones a obtener son imprescindibles para una buena planificación y control de la producción, y la empresa debería acometerlo vaya a implantar o no MRP II.

Por tanto, no se puede afirmar que MRP II sea excesivamente costoso si tenemos en cuenta los beneficios que puede reportar, si bien dicho coste puede ser un freno para muchas empresas[18].

5.8.2.2. *Dificultad de implementación*

Cuando hablamos de implementación no nos estamos refiriendo sólo a la instalación del software, sino también al proceso de hacer que éste opere eficazmente en el entorno real. Ello implica acostumbrar a los usuarios a relacionarse con el Sistema, a seguir los procedimientos y la disciplina de datos impuesta por aquél y a actuar con la información generada por el mismo. En este proceso, la instalación del software no es más que una fase, la cual incluirá otras muchas actividades, como el estudio previo, la educación y formación del personal, la distribución y asignación de funciones y responsabilidades, la selección del hardware y software adecuado al caso, la preparación de las bases de datos, etc.

En definitiva, la implementación es un largo proceso (de una duración entre uno y dos años) que culminará con la instalación y control continuados del sistema. La realidad muestra que culminar felizmente todo el proceso es bastante difícil. Así, en 1975, el porcentaje de fracasos en implementación de sistemas MRP originarios se cifraba en el 96 por 100 (Wight, 1975), reduciéndose al 56,5 por 100 en 1980 (Schroeder y otros, 1982) como consecuencia de la experiencia práctica adquirida en el uso de dicho sistema. El porcentaje de fracasos para Sistemas MRP II en 1985 era del 80 por 100 (Savage, 1988) al 85 por 100 (Kamenetzy, 1985). No nos cabe duda de que hoy debe ser menor al añadirse nueve años de experiencia en su uso; pero, aún así, sigue siendo muy alto.

Problemas con la formación y actitud del personal, la exactitud de los datos, el apoyo de la Alta Dirección, el software seleccionado, etc, se van a presentar durante el proceso de implementación. Por ello, aunque salvables, no han de ser perdidos de vista, siendo éste el motivo de que tantos autores hayan estudiado en profundidad esta problemática (ver Apartado 5.9).

5.8.2.3. *Defectos técnicos*

Dentro de este apartado incluimos todos los defectos relativos a los procesos de cálculo empleados por MRP II en el desarrollo de sus funciones, los cuales resumiremos a continuación.

---

[17] Por ejemplo, CIMPAC de Weir Systems, IMS7 de Honeywell Bull, IPCOM de CSD/Ibermática, MAC-PAC de Arthur Andersen, PRODSTAR MRP de Prodstar, etc.

[18] En relación con este tema, Sum y Yang (1992, pág. 195), en un exhaustivo estudio sobre la implantación del MRP en Singapur, alientan al Gobierno a incentivar a las empresas para la adopción de estos sistemas con objeto de mejorar el sector industrial.

MRP II acentúa la disponibilidad de materiales sobre la de herramientas y centros de trabajo. Para que los pedidos puedan ser llevados a la práctica es necesario que estén disponibles material, capacidad y herramientas. MRP II asegura el primer elemento, también el segundo condicionado al primero, pero casi no tiene en cuenta el tercero. De hecho, la mayoría de los paquetes MRP II se limita a proporcionar un registro para cada herramienta que permite introducir sus datos, pero no la tiene en cuenta a la hora de emitir o planificar pedidos.

El segundo problema es relativo al dimensionado de los lotes. Cualquier paquete MRP II proporciona una serie de técnicas al respecto, las cuales se aplican a cada ítem por separado. Sin embargo, en la realidad, las necesidades de los productos finales no son independientes de las de sus componentes, ni las de los componentes de los items que los forman, y así sucesivamente. Esta dependencia también se dará cuando se trate de items que forman parte de diferentes productos. No obstante, no existe realmente una técnica que no incurra en este problema y a la vez pretenda un inventario cero. Se quiera o no, los lotes de los elementos de un nivel de la Lista de Materiales siempre habrán de estar condicionados por los de los niveles superiores.

El tercer problema se refiere a los caminos alternativos dentro de una ruta. Muchos sistemas MRP II rastrean y programan trabajos que siguen una línea de ruta. Sin embargo, puede ocurrir que una operación (o grupo de ellas), pueda ser sustituida por otra (o grupo de ellas) alternativa, pero el tratamiento de las rutas y operaciones alternativas, en la mayoría del software MRP II, es un registro no utilizado en la programación de las operaciones. No obstante, ha de considerarse que esto es un problema del software y no del Sistema. Además, en muchos casos, no es importante; si la programación es a capacidad finita puede convertirse en un grave problema, pero si es a capacidad infinita, el Sistema ha de partir del hecho de que no tiene por qué buscar una ruta alternativa. Además, esta opción quedará siempre a juicio del programador, el cual, ante una sobrecarga detectada en un período del Plan CRP, tendrá que optar entre proponer medidas de incremento temporal de la capacidad disponible o elegir una ruta alternativa.

El cuarto problema hace referencia a que muchos paquetes MRP II utilizan un TS constante para cada ítem, independientemente del tamaño del lote. Este TS se calcula para el lote medio, pero si éste resulta ser superior o inferior al real, se estará incurriendo en todos los problemas derivados de ello (ver Capítulo 2). No obstante, existen paquetes estándar que permiten elegir entre varios posibles tamaños de TS para un lote, como, por ejemplo, el MAPICS a partir de la versión DB[19], lo cual no resuelve pero palía el problema.

El quinto problema es la fiabilidad de las previsiones de demanda desarrolladas por la empresa. Estas serán las que proporcionen los datos básicos para la elaboración de planes y programas, por lo que se trata de información vital para el sistema y su exactitud es muy importante. No quiere esto decir que hayan de ser correctas en un 100 por 100; sería casi imposible. Los sistemas MRP cuentan con la reprogramación para actualizar los planes y corregir las desviaciones producidas por divergencias en las previsiones realizadas; sin embargo, si no hay un mínimo de estabilidad en éstas el sistema será inoperante. No obstante, este problema se tendrá cualquiera que sea el proceso de planificación seguido, no siendo por tanto, algo achacable a MRP II. En realidad esto es más bien una restricción para MRP II y para cualquier proceso de planificación fiable.

[19] MAPICS es marca registrada de software de IBM.

Por último, señalaremos que no siempre es posible lograr que los proveedores se ajusten a los tiempos de suministro negociados o comunicados a la empresa. Qué duda cabe que contar con muchos items cuyo tiempo de suministro sea errático (o muy variable) hará que los planes de materiales (y por tanto todos los relacionados con éstos) sean difíciles de cumplir. Sin embargo, en muchos casos se pueden paliar estos efectos realizando contratos anuales, enviando con antelación el programa de pedidos al proveedor correspondiente, estableciendo un stock de seguridad para algunos items, etc. Además, se trata de un problema que afectará a la gestión de inventarios y a la planificación de la producción en general.

A la vista de las ventajas e inconvenientes señalados no se pueden realizar afirmaciones absolutas. La práctica ha demostrado que MRP II puede dar muy buenos resultados en algunos casos y muy malos en otros; el caso concreto dará la solución a esta cuestión. Ni MRP II es una panacea ni es un sistema inoperante. Habrá empresas que logren un gran éxito y otras (creemos que las menos entre las fabriles medianas y grandes) para las que no funcione adecuadamente. No obstante, hay una cuestión adicional que nos hace inclinarnos un poco más hacia una consideración positiva de la cuestión. Esta es el hecho de que, dado el complicadísimo mundo de la fabricación actual, marcado por el dinamismo, la flexibilidad y la competencia, difícilmente la empresa puede hacer caso omiso de técnicas como MRP II. Por ello, nos parece inadecuado rechazarlo de entrada por su complejidad y coste sin antes analizar sus posibilidades en el caso concreto. Buena prueba de ello es el gran número de empresas que utilizan este sistema (ver Apartados 5.10 y 5.11).

5.9. PROBLEMATICA DE LA IMPLEMENTACION DE LOS SISTEMAS MRP

Si algún factor ha contribuido a atenuar el ritmo de crecimiento del número de firmas usuarias de MRP/MRP II, a pesar de los cuantiosos beneficios que podrían haber obtenido, éste es, sin duda, el alto número de empresas que han fracasado en su intento, o bien lo han abandonado o no han llegado a desarrollarlo lo suficiente como para convertirse en empresas tipo A[20]. De acuerdo con los estudios que posteriormente analizaremos, estos altos índices de fracaso se deben, por una parte, al desarrollo de un proceso de implementación inadecuado en el que no se resuelven los importantes problemas que se presentan. Existen múltiples circunstancias a considerar en la puesta en práctica de cualquier sistema de información mecanizado[21], pero, además, en el caso de los Sistemas MRP, cobran especial importancia una serie de cuestiones que posteriormente analizaremos. Por otra parte, se da el hecho de que «todas las empresas que fallan en la implementación de sus sistemas MRP suelen continuar cometiendo los mismos fallos en sucesivas implementaciones» (Berger, 1977, pág. 194).

Centrándonos ya en el primer punto, son muchos los estudios realizados sobre la implementación de estos sistemas, de entre los que cabe destacar el desarrollado por los miembros del Departamento de Investigación de Operaciones de la Universidad de Minnessota[22] en 1980 sobre 1.700 empresas miembros

[20] En el estudio de la Oliver Wight Companies, citado en el apartado anterior, se estableció que sólo 200 empresas de las 1.123 usuarias de MRP/MRP II analizadas cumplían los criterios para ser clasificadas como tipo A.

[21] Ver, por ejemplo, Schultz-Slevin (1975), Wysocky (1979), Lucas (1975) o Morris (1979).

[22] Schroeder, Anderson, Tupy, White (1981), y White, Anderson, Schroeder, Tupy (1982).

de APICS, al que llamaremos estudio A; el realizado por Fisher (1981, págs. 48 a 53), al que llamaremos estudio B, y el ya citado de la Oliver Wight Co. (1985), al que llamaremos estudio C. De ellos se puede derivar que los problemas fundamentales que surgen en la implementación de MRP/MRP II, llevando al fracaso, se pueden resumir en los que comentamos a continuación.

5.9.1. Problemas en torno al personal

De los estudios anteriormente mencionados se deduce que uno de los requisitos fundamentales para el éxito del MRP II es que se eduque en el Sistema a, prácticamente, todas las personas que desarrollan su actividad en la empresa. Así, según el estudio A, un 23 por 100 de las empresas consideraban que su fallo más importante en la implementación MRP fue la insuficiente **educación del personal**; según el B, el 54 por 100 de las empresas señalaron este problema como uno de los importantes, y, según el C, el 55 por 100 de las empresas manifestaron que, de volver a implementarlo, mejorarían la educación. Estos datos dan una idea de la importancia de este punto. El término «educar» lo empleamos aquí con toda intención, ya que no sólo es necesario que el personal relacionado con el Sistema conozca su funcionamiento, sino que, además, es preciso que cambie su visión sobre la gestión de materiales en particular, y sobre el área en la que desarrolla su actividad en general, así como sobre la forma en que ha de desarrollarla. Desde un principio hay que tener en cuenta que MRP II es, por definición, un sistema informático *on line* con una base de datos única. Cualquier actuación fuera de lo establecido se verá reflejada y actualizada en los ficheros comunes y afectará al resto de áreas abarcadas por el Sistema. Por ello, se vuelve más importante que nunca que todo el personal de la empresa involucrado en el Sistema esté bien entrenado y tenga suficiente conocimiento sobre cómo trabaja éste. Además, resulta evidente que MRP es un Sistema de comunicación que afecta a toda la empresa; por tanto, es necesario que los emisores y receptores se entiendan para conseguir realmente el intercambio de información necesario para la utilización de MRP. Debido a ello, es necesario que los usuarios empleen un vocabulario común, que cambien la rutina contraída con los procedimientos anteriores, los «vicios» y costumbres adquiridos con el tiempo, así como la toma de decisiones unilateral sin fijarse en las posibles repercusiones sobre el resto de las áreas.

Otra cuestión diferente es cómo debe llevarse a cabo esta labor. A este respecto, diremos que la forma más adecuada para conseguirlo es a través de los métodos de educación y entrenamiento (*training*). Comercialmente se dispone de medios audiovisuales sobre MRP; asociaciones como APICS y empresas como la Oliver Wight, la George Plossl Educational Services o Arthur Andersen, cuentan con cursos sobre la materia y planes completos de formación[23].

Otro de los problemas fundamentales relativos al personal, que los estudios mencionados consideran causa importante de fracasos en la implementación de sistemas MRP, es la **actitud ante el cambio**. Así, según el estudio A, el 11 por 100 de las empresas consultadas señaló éste como el problema más importante que habían padecido en la implementación. Existe miedo a la pérdida del puesto de trabajo, al ver que el ordenador desarrolla en todo o en parte su tarea. También está el temor que provoca todo sistema que, como MRP II, proporciona información constantemente y hace que los errores salten a la vista; éstos se visualizan en las pantallas de los terminales, no permitiendo al personal procurarse excusas o incluso ocultar los hechos. Existen, además, otros motivos que provocan el temor del personal, tales como la incertidumbre ante lo que traerá el nuevo método, las implicaciones de formación y cambio de actitud que provocan, las nuevas responsabilidades que conlleva, etc. (Wacker y Hills en 1977, pág. 7 y ss.).

Es importante, pues, acabar con ese tipo de sentimientos ante el cambio, lo que implica, de un lado, hacer sentir al personal que el nuevo sistema es «su sistema», y no el de la Alta Dirección. Por otro lado, deberá producirse una adecuada actuación por parte de esta última, que vaya encaminada a reducir la incertidumbre y el miedo que el cambio provoca en el personal afectado, haciéndoles ver lo imprescindible de su colaboración y las ventajas que para ellos traerá el nuevo sistema. Además, no sólo es necesaria esa actitud positiva ante el cambio, sino que se precisa un apoyo continuado al proyecto, sin el cual es difícil llegar a obtener el éxito (28 por 100 de las empresas encuestadas en el estudio B).

[23] Para un análisis de la forma de desarrollar el proceso de formación, puede verse, por ejemplo, Wight (1982), Wallace (1985), Dunn (1982), Bourke (1988) o García (1992).

5.9.2. Falta de exactitud en los datos

Uno de los preparativos más delicados en la implementación de un Sistema MRP es el de depuración y corrección de todos los datos con los que el Sistema trabaja. Está claro que es necesaria una gran exactitud en las listas de materiales, registros de inventario, etc., que MRP II ha de utilizar, puesto que, en caso contrario, se partiría de datos incorrectos y el Sistema estaría abocado al fracaso. Según el estudio A, un 9 por 100 de las empresas consideraron éste como el problema más importante en la implementación, subiendo al 40 por 100 en las empresas encuestadas en el estudio B. En esta opinión de que MRP no puede funcionar si los datos introducidos no son exactos coinciden numerosos autores[24].

Por supuesto, las medidas de seguridad y el extremado cuidado en la introducción de información no debe quedar en la fase de implementación, sino que durará tanto como dure el Sistema. En este sentido, una medida muy importante, adoptada por todas las empresas usuarias MRP, es el recuento cíclico de los inventarios (ver Apartado 1.4.3.2)[25].

En cuanto a los puntos en que se suele dar una menor precisión en los datos (estudio A) éstos son: las previsiones de demanda (y, por tanto, el Programa Maestro de Producción), los datos para el control y gestión del taller y los datos sobre capacidad productiva de la empresa. Es interesante observar que estas áreas eran las que menor automatización tenían en las empresas antes de la implementación de MRP. Esto parece indicar que la informatización conllevará, al menos hasta cierto punto, un incremento en la calidad de la información empleada.

5.9.3. Apoyo de la Alta Dirección

Se trata de un aspecto fundamental en la implementación de un Sistema MRP. El 20 por 100 de los encuestados en el estudio A lo consideró como el más importante de todos los problemas acaecidos; el 60 por 100 de las empresas encuestadas en B daban a este factor una gran importancia; el 48 por 100 de las empresas del C incrementarían el apoyo de la Alta Dirección si volvieran a implementar el

[24] Ver, por ejemplo, Rout (1979), Quingley (1980), Gupta (1977) o Anderson y Schroeder (1978).
[25] Para más información ver, por ejemplo, Stewart (1979).

Sistema. Normalmente, esta última suele delegar totalmente las responsabilidades en un director de proyecto con conocimientos técnicos del tema, lo cual es totalmente insuficiente. Es necesario, además, un compromiso claro y continuado de la Alta Dirección con el proyecto y que este apoyo se haga patente.

5.9.4. Problemas en torno al software y al hardware

Cualquier sistema integrado de gestión que se quiera instalar en la empresa va a implicar, entre otras cosas, importantes restricciones para los diferentes departamentos afectados en cuanto a la libertad de introducir alguna modificación en el mismo. MRP II no es una excepción a esta regla. Como consecuencia, el Sistema ha de ser diseñado desde el principio de forma que se establezcan claramente todos los puntos a los que afecta en la empresa, debiendo tenerse en cuenta todas las necesidades actuales y futuras en las diversas áreas. Según el estudio B, el 27 por 100 de las empresas encuestadas consideró como un problema importante el realizar un diseño defectuoso del Sistema. El 28 por 100 de las encuestadas en el estudio C elegiría un mejor software de tener que volver a implementar el sistema.

Realmente, como ya comentamos anteriormente, el mercado ofrece una amplia variedad de paquetes de software MRP/MRP II, con una amplia gama de características y casi para cualquier tipo de hardware (incluidos los PC)[26].

5.9.5. Fallos en la elaboración y desarrollo del Plan

Nos referimos en este punto a fallos tales como el desarrollo de un plan de implementación inadecuado, el no utilizar un equipo de seguimiento del proyecto o utilizar uno malo, el apresuramiento en el cumplimiento de las diferentes fases de la implementación, o el esperar que el Sistema rinda beneficios a corto plazo. Según el estudio A, el 15 por 100 de las empresas encuestadas consideró que estos problemas fueron los más importantes; en el estudio C, el 43 por 100 consideró el Plan de Implementación como uno de los aspectos básicos. Existen múltiples posibilidades, que pueden ser tomadas como base para la elaboración de un plan adecuado al caso concreto[27].

5.9.6. Otros problemas

Además de lo comentado en los apartados anteriores, existen otros problemas importantes, que resumimos seguidamente.

5.9.6.1. *Problemas técnicos*

El estudio A reflejó que el 15 por 100 de las empresas encuestadas consideraba estos problemas, derivados de la propia técnica MRP, como los más importantes. En realidad, son problemas que deben quedar resueltos con una adecuada educación y entrenamiento, por lo que es quizá más un problema de este tipo que técnico del Sistema. No obstante, no debe subestimarse, ya que el Sistema MRP II conlleva el aprendizaje de nuevas técnicas de gestión que será necesario dominar.

[26] En un estudio desarrollado para 1990 (García, 1992, pág. 990 y ss.) se llegaron a identificar en el mercado (norteamericano y europeo) 224 paquetes de software MRP/MRP II. Scott (1994, pág. 136) indica las principales variaciones existentes entre los distintos paquetes de software.

[27] Ver, por ejemplo, Buker (1987), García (1991), Martel-Argel (1990) o Wight (1981).

5.9.6.2. *Establecimiento de medidas de control*

Una buena puesta en marcha no garantiza su éxito posterior. Es preciso establecer las medidas necesarias para el seguimiento y control del Sistema, tanto durante el período de implementación como después y durante toda la vida de MRP. Ello permitirá tomar las medidas correctoras oportunas ante desviaciones sobre los objetivos trazados.

5.9.6.3. *Problemas de tipo organizacional*

Las funciones que engloba MRP II abarcan un alto porcentaje de los costes de la empresa; sin embargo, a menudo no se aprecia la importancia de esta consideración y el Sistema no es apoyado por personal suficiente en cuantía y cualificación.

Como se puede apreciar por lo expuesto hasta aquí, los problemas derivados de la implementación están identificados en su gran mayoría. Cualquier empresa que decida acometer la puesta en marcha de MRP o MRP II cuenta con referencias suficientes como para preverlo y estar preparada para solventarlo. Como en muchas otras ocasiones, la experiencia pasada se convierte en una buena consejera, y hacer caso de ésta aumentará, sin duda, la probabilidad de éxito en el proyecto MRP.

5.10. APLICABILIDAD Y CONVENIENCIA

Para Oliver Wight (1992, pág 14), el Sistema MRP II es aplicable incluso en casos donde el proceso de fabricación sea simple o los costes de fabricación signifiquen un pequeño porcentaje de las ventas. Cierto es que, incluso en estos casos, es fundamental la coordinación de todas las actividades de la empresa, lo cual es uno de los problemas más complicados de la gestión; pero, como este mismo autor deja claro, es fundamentalmente en las empresas fabriles donde este sistema muestra su validez.

Ciñéndonos al caso de este tipo de firma, ¿dónde sería aplicable MRP II? Como ya hemos dicho, MRP II es un simulador del funcionamiento real de la empresa y, en consecuencia, el Sistema valdría para cualquier empresa manufacturera. En este sentido se pronuncian Melnyk y González (1985, pág. 124 y ss.), al valorar un estudio encaminado a analizar la utilidad de MRP II y los beneficios que podía proporcionar en empresas manufactureras de diferente tamaño, diferentes sectores de actividad, diferentes tipos de procesos de fabricación, diferentes tipos de clientes y proveedores, etc. Para ello seleccionaron y estudiaron a fondo cinco empresas del Medio Oeste americano, algunas de ellas líderes de mercado. Todas ellas (llamadas en el estudio A, B, C, D y E), eran usuarios expertos de MRP II, y las características fundamentales de las mismas las recogen en un cuadro que transcribimos en la Tabla 5.14. Como se puede apreciar, las cinco empresas recogen un amplio abanico de características diferentes; sin embargo, éstas no impedían que MRP II fuese muy útil en todas ellas.

Tabla 5.14. Características de cinco empresas exitosas con MRP II

Características \ Empresa	A	B	C	D	E
Orientación de la fabricación	∘ Producción para inventario ∘ Montaje sobre pedido	∘ Producción sobre pedido ∘ Producción para inventario	∘ Producción para inventario	∘ Montaje sobre pedido	∘ Producción para inventarios ∘ Producción sobre pedido
Línea de producto principal	∘ Sistemas para conducción y medida de fluidos	∘ Correctores eléctricos para sistemas de fuerza y maquinaria eléctrica	∘ Productos farmacéuticos	∘ Equipamientos hospital, mobiliarios, suministros de materiales desechables	∘ Mecanismos hidráulicos y bombas
Principales clientes	∘ Principales empresas petrolíferas y distribuidores autorizados, municipios, agricultores	∘ Mayoristas en electricidad	∘ Mayoristas independientes, Gobierno e instituciones	∘ Hospitales, Gobierno, Universidades, Instituciones	∘ Equipos de construcción
Tamaño del lote de fabricación	∘ Variable, entre grande y muy grande	∘ Variable, entre grande y moderado	∘ Variable, entre grande y moderado	∘ Variable, entre pequeño y grande	∘ Variable, entre pequeño y muy grande
Organización	∘ Multiplanta ∘ Multinacional	∘ Planta única	∘ Multiplanta ∘ Multinacional ∘ Gestión de la Producción e inventarios descentralizada	∘ Multiplanta ∘ Multinacional	∘ Multiplanta
Alcance de las actividades bajo MRP II	∘ 135 millones $ en ventas ∘ 1.000 empleados	∘ 25 millones $ ∘ 200 empleados	∘ 1 billón $ en EE. UU. ∘ 5.000 empleados	∘ 120 millones $ ∘ 2.400 empleados	∘ 23 millones $ ∘ 150 empleados

Hemos afirmado que MRP II es aplicable, en principio, a cualquier empresa productiva, pero pensamos que hay que matizar algo más. Desde nuestro punto de vista, para que MRP II funcione con éxito tras un adecuado proceso de implementación es necesario, además, que su capacidad financiera, su capacidad de gestión y su entorno se lo permitan. Su capacidad financiera debido al gran coste que su puesta en funcionamiento requiere; su capacidad de gestión debido a lo complejo del Sistema en sí y a los grandes problemas que van a surgir durante y después de la implementación; por último, su entorno, porque si la empresa es incapaz de prever su demanda con la exactitud necesaria o si es imposible establecer condiciones de períodos de pago a proveedores, o de cobro a clientes, o si no puede asegurarse con un mínimo de garantía el cumplimiento de los tiempos de suministro por parte de los proveedores, etc., están faltando las bases para que el Sistema funcione.

Los resultados demuestran que ello es así. Si analizamos un estudio sobre el porcentaje de empresas manufactureras que empleaban MRP II en 1986[28] (Tabla 5.15), se puede comprobar que MRP II está presente en todos los sectores industriales, lo que indica que en cualquiera de ellos se puede emplear.

[28] Desarrollado por la *International Data Corporation* en base a los datos del *U. S. Census Bureau* (citado en Foley, 1988, pág. 63).

Tabla 5.15. Porcentaje promedio y empleo de MRP II (por sectores en Norteamérica, 1986)

Sector Industrial	Porcentaje de usuarios	Número de Sistemas
Automoción y componentes	55,9	2.109
Electrónica e instrumentación	51,6	12.631
Procesamiento de metales	17	5.001
Máquinas y herramientas	10,5	5.852
Bienes de consumo	8,1	2.589
Transporte/Construcción	5,4	2.864
Procesamiento	2,3	3.445

No obstante, es importante no confundir aplicabilidad con conveniencia: una cosa es que MRP II sea aplicable en cualquier industria manufacturera con las condiciones citadas, y otra muy diferente, es que sea conveniente en todos los casos. Incluso de la poca implantación que tiene en algunos sectores (ver Tabla 5.15) se podría deducir que MRP II es más útil en unos sectores que en otros; es evidente que, en los casos donde la Planificación y Control de la Producción sea más compleja, MRP II podrá proporcionar muchas más ventajas. Parece, pues, que el **ámbito ideal de aplicación de MRP II** conlleva:

- Un entorno de producción por lotes, normalmente grandes.
- Profundas listas de materiales y gran cantidad de items.
- Una configuración productiva por funciones.

A este respecto, algunos autores (por ejemplo, Scott: 1994, pág. 314) opinan que una de las posibles causas de fracaso en la práctica puede ser el intentar aplicar el sistema estándar a entornos productivos en los que no resulte conveniente, sin realizar, previamente, la adaptación necesaria.

5.11. EXTENSION EN EL USO DE LOS SISTEMAS MRP

Tras todo lo explicado en el presente capítulo, creemos que quedan claras las ventajas y costes que conllevan los sistemas MRP, así como sus posibilidades de aplicación. Es innegable el atractivo del Sistema para la empresa industrial, dados los beneficios en juego. Es esto, sin duda, lo que ha motivado que, aun sabiendo el alto riesgo de fracaso, cada vez sea mayor el número de empresas que se suman a MRP, de forma que en la actualidad dichos sistemas se han convertido en uno de los más empleados por las empresas en EE. UU. y Europa.

Citaremos dos estadísticas al respecto. Según la primera, elaborada por la Oliver Wight Software Research (Foley, 1988, págs. 62 y 63), de las 43.000 empresas fabriles con un número de trabajadores superior a 100 que había en Estados Unidos a finales de 1987, entre 8.000 y 15.000 estaban usando MRP II (lo cual representa entre el 18,6 y el 34,89 por 100). Según la segunda, desarrollada por la International Data Corporation en base a datos del U. S. Census Bureau de 1987, los sistemas MRP II habían conseguido una penetración en la industria americana del 10,1 por 100 en 1986 (hay que tener en cuenta que aquí se incluyen todas las empresas industriales, sea cual sea su tamaño, lo cual hace disminuir mucho el porcentaje, pues la mayoría son pequeñas y medianas y éstas son las que menos usan este sistema). De esta tasa de penetración de MRP II habría que restar aún los paquetes que se adquirieron para sustituir otros, resultando un

porcentaje real de empresas usuarias de MRP II del 7,07 por 100 según la autora. No obstante, esta extensión del uso de MRP II varía mucho por sectores, como se puede apreciar en la Tabla 5.15, teniendo en sectores como la Automoción y Componentes o la Electrónica y la Instrumentación, una penetración al menos tres veces mayor que en los demás.

En lo que al **caso español** se refiere, los datos existentes son pocos. No obstante, del estudio de mercado que nos fue proporcionado por Prodstar España se puede destacar un conjunto de datos muy interesante. En lo que se refiere al número de paquetes, fueron instalados 100 durante el año 1987; no obstante estos datos hay que tomarlos con reservas, dado que no contemplan los paquetes adquiridos por las empresas en el extranjero, ni tienen en cuenta qué módulos de estos paquetes fueron instalados. El mismo estudio citado indica que, en diciembre de 1987, existían al menos 438 licencias vendidas de paquetes MRP, a las que habría que añadir un buen número adquirido en el exterior (sobre todo en empresas filiales de multinacionales), así como los desarrollados a medida en empresas. Parece, pues, que la industria española apuesta por MRP, al menos en cierta medida. De hecho, durante 1988 se instalaron alrededor de 120, cifrándose en 582 las empresas que, a finales de 1988 habían adquirido licencias de paquetes MRP en nuestro país.

Creemos que la impresión sobre la extensión futura de este tipo de sistemas no tiene por menos que ser positiva. Por ello, los vendedores de software se han lanzado a la captura de lo que consideran un jugoso mercado, como se puede deducir de la gran cantidad de paquetes de este tipo que ya existen a la venta.

5.12. CONSIDERACIONES FINALES

De lo hasta aquí expuesto se desprende que los sistemas MRP pueden implicar importantísimas mejoras para las empresas que los implementan con éxito, pero también que no son una panacea aplicable con éxito de cualquier forma y a cualquier caso. Es necesario, pues, tener en cuenta, por una parte, las dificultades de su implementación, con objeto de hacerles frente de antemano, y, por otra, analizar si el paquete de software a adquirir se adecúa al entorno productivo en el que va a aplicarse. La importancia de esta última cuestión ha hecho evolucionar a estos sistemas desde las aplicaciones estándar hacia otras, utilizables en contextos menos tradicionales. De ello han surgido los híbridos con *Just in Time* (ver Apartado 7.12) o aquellos que permiten adecuarlo a un contexto de producción de *job-shop* sobre pedidos, en los que se da poca homogeneidad en el contenido del trabajo y gran variación de costes y operaciones (ver Scott, 1994, pág. 117 y ss.). Todo esto deja claro que MRP no es un sistema estándar concreto, sino una filosofía a la que se pueden adecuar distintos sistemas.

Otro aspecto a no olvidar es que los sistemas MRP II pueden hacer funcionar mejor el sistema productivo al que se aplican, pero que no lo transforman como, por ejemplo, hace el J. I. T. (ver Capítulos 6 y 7). Por tanto, el componente estratégico es menor que en dicho sistema y, además, es claro que los beneficios obtenidos por MRP II serán aún mayores si, previamente, se mejora el sistema al que se va a aplicar.

Por último, diremos que, aunque estos sistemas son básicamente aplicables al sector industrial, algunos autores indican que son potencialmente aplicable a algunos casos del **sector servicios** cuando éstos requieran conjuntos de materias primas o componentes. Gaither (1992, pág. 478) cita las operaciones quirúrgicas

en grandes hospitales o los servicios profesionales de alto volumen de demanda. Del mismo modo se pronuncia Schroeder (1993, pág. 651 y ss.), que indica que, al sustituir las listas de materiales por listas de factor trabajo, se puede explotar un PMP en las distintas actividades y personal necesarios para obtener un cierto mix de servicios. Pone, además, un ejemplo de aplicación en las empresas eléctricas e indica que, aunque se está comenzando a aplicar a los servicios, su potencial puede ser grande en dicho sector.

APENDICE 5A:

METODO CRP DETALLADO

Vamos a trabajar sobre el Ejemplo 5.1. Con objeto de facilitar los cálculos a realizar hemos elaborado la Tabla 5.16, en la cual se desglosa el tiempo de suministro en sus distintos componentes de acuerdo con lo expuesto en el Apartado 1.4.2.3. Asimismo, se han considerado las distintas operaciones necesarias para obtener cada ítem y los Centros de Trabajo en que se realizan (ver Figura 5.2); en éstos se ha indicado la capacidad diaria disponible en horas reales y en horas estándar (de Tabla 5.2). De esta forma, se ve claramente el desarrollo de cada proceso y los tiempos que ello implica; así, por ejemplo, para obtener un lote de P1 se comienza confeccionando el pedido, a continuación se realizan las operaciones O1 (en CT3), O2 (en CT2) y O3 (en CT3). Por último, el lote obtenido pasa a inspección tras un tiempo de espera. La suma de todos estos tiempos da lugar al tiempo de suministro total que aparece en la última columna y que se calcula como se indica en 5.A.1.

5.A.1. Cálculo del TS de P1 (en días)

Confección pedido P1 = 4 h.r./ 8,5 (h.r./día) = 0,47 días.
Desplazamiento a CT3 = 1 h.r./8,5 (h.r./día) = 0,12 días.
Cola en CT3 = 4 h.e./ 5,45 (h.e./día) = 0,73 días.
Preparación en CT3 = 1 h.e./5,45 (h.e./día) = 0,18 días.
Ejecución O1 (del lote) = 5,48 min.e. ×
× 186 un. × A_{P1}[29] = 15,48 h.e./5,45 (h.e./día) = 2,84 días.
Desplazamiento a CT2 = 1 h.r./8,5 (h.r./día) = 0,12 días.
Cola en CT2 = 4 h.e./ 6,5 (h.e./día) = 0,62 días
Preparación en CT2 = 1 h.e./6,5 (h.e./día) = 0,15 días.
Ejecución O2 (del lote) = 1,04 min.e. ×
× 186 un. × 0,9124/60 (min.e./h.e.) =
= 2,94 h.e. = 2,94 h.e./6,5 (h.e./día) = 0,45 días.
Desplazamiento a CT3 = 1 h.r./ 8,5 (h.r./día) = 0,12 días.
Cola en CT3 = 4 h.e./5,45 (h.e./día) = 0,73 días
Preparación en CT3 = 1 h.e./ 5,45 (h.e./día) = 0,18 días.
Ejecución O3 (del lote) = 1,53 min.e. ×
× 186 un. × 0,9124/60 (min.e./h.e.) =
= 4,32 h.e./5,45 (h.e./día) = 0,79 días.
Espera final = 0,5 h.r./8,5 (h.r./día) = 0,06 días.
Inspección = 4 h.r./8,5 (h.r./día) = 0,47 días.
Tiempo de suministro total = 8,03 días.

El tiempo obtenido no coincide con el empleado en la planificación de materiales (Tabla 5.4: 2 semanas × 5 días = = 10 días) pues, por una parte, el TS planificado para MRP no se hace depender del tamaño del lote y, por otra, se expresa en semanas enteras para simplificar. Dichos tiempos suelen calcularse como promedio de datos históricos y, en algunos casos, pueden incorporar un cierto tiempo de seguridad (ver Capítulo 4), redondeando a semanas por exceso. Existe, pues, una discrepancia entre ambos, por lo que al programar las operaciones tenemos un tiempo sobrante (de 1,97 días en nuestro caso), que puede dejarse al comienzo o al final del proceso. Ello daría lugar a distintas fechas posibles de comienzo y fin de las operaciones y, con ello, a distintas distribuciones de carga en los CT; ambas opciones de programación se explican seguidamente.

[29] Expresión (4) en Apartado 2.A.5. El dato numérico (AP1 = = 0,9124) procede de la Tabla 5.4.

5.A.2. Programación hacia adelante (*forward scheduling*) y hacia atrás (*backward scheduling*)

La primera hace coincidir la emisión del pedido con el comienzo del TS Planificado. A partir de ahí va sumando los tiempos de cada una de las operaciones, estableciendo así los momentos de comienzo y fin de cada una de ellas; tras la finalización de la inspección quedará el tiempo sobrante. Por el contrario, la *Programación hacia atrás* hace coincidir la finalización del pedido (fin de la inspección) con la fecha final del TS Planificado, restando hacia atrás los tiempos de cada operación; de esta forma, el tiempo sobrante quedará delante del comienzo de la confección del pedido. La Figura 5.3 recoge ambas programaciones para el lote de 186 unidades de P1, planificado para emitir a final del período 1 (final del día 5) y a recibir a final del período 3 (final del día 15). Los tiempos empleados para programar son los obtenidos en 5.A.1, habiéndose resaltado los tiempos de preparación y ejecución, que son los que producen carga. Es evidente que, si no se desea retrasar la ejecución planificada, la fecha real de comienzo debe estar comprendida entre el día 5 (comienzo en 5.3.A) y el 6,96 (comienzo en 5.3.B).

5.A.3. Cálculo de cargas en los CT: plan CRP detallado

Dado que la distribución de cargas dependerá del tipo de programación empleada, habrá que optar por una de ellas. Acto seguido, se situarán en el tiempo, para cada CT, las cargas que proceden de la preparación y de la ejecución de cada operación. La Tabla 5.17 muestra los resultados obtenidos (para cada uno de los tamaños de lote del plan de materiales de la Tabla 5.6) a partir de las fechas procedentes de una programación hacia delante (ver, por ejemplo, como las fechas finales de la columna correspondiente en P1, coinciden con las de la Figura 5.3.A después de restarles 5. Dicha resta tiene el objeto de colocar el comienzo de las actividades en 0 en lugar de en 5, de forma que los datos de la

Tabla 5.16. Detalle de componentes ordenados del Tiempo de Suministro

	Ítem	Confección pedido(1)	CT1 (Capacidad = 8,5 h.r. = 8,16 h.e.) Desplazamiento(2)	CT1 Cola(3)	CT1 Preparación(3)	CT1 Ejecución(4)	CT2 (Capacidad = 8,5 h.r. = 6,5 h.e.) Desplazamiento	CT2 Cola(3)	CT2 Preparación(3)	CT2 Ejecución(4)	CT3 (Capacidad = 8,5 h.r. = 5,45 h.e.) Desplazamiento(2)	CT3 Cola(3)	CT3 Preparación(3)	CT3 Ejecución(4)	Espera(1)	Inspección(1)	TS total (en días)
Lote = 186(5)	P1	4 h.r.															
	O1										1 h.r.	4 h.e.	1 h.e.	5,48 min.e.			
	O2						1 h.r.	4 h.e.	1 h.e.	1,04 min.e.							
	O3										2 h.r.	4 h.e.	1 h.e.	1,53 min.e.			
	Lote final														0,5 h.r.	4 h.r.	8,04
Lote = 113(5)	P2	4 h.r.															
	O4										0,4 h.r.	4 h.e.	1 h.e.	5,653 min.e.			
	O5						1 h.r.	4 h.e.	1 h.e.	2,685 min.e.							
	O6										1 h.r.	4 h.e.	1 h.e.	0,51 h.e.			
	Lote final														0,5 h.r.	4 h.r.	6,46
Lote = 215(5)	I12	4 h.r.															
	O7		0,6 h.r.	3 h.e.	1 h.e.	5,966 min.e.											
	O8						0,5 h.r.	4 h.e.	1 h.e.	5,369 min.e.							
	O9		0,5 h.r.	3 h.e.	1 h.e.	4,583 min.e.											
	Lote final														0,5 h.r.	4 h.r.	9,24
Lote = 264(5)	I21	4 h.r.															
	O10						0,8 h.r.	4 h.e.	1 h.e.	2,339 min.e.							
	O11		0,8 h.r.	3 h.e.	1 h.e.	1,244 min.e.											
	Lote final														0,5 h.r.	4 h.r.	4,37

(1) Como puede observarse en la tabla, estos tiempos, medidos en horas reales, se han supuesto iguales para los distintos ítems.
(2) Extraídos de la Tabla 5.1.
(3) Extraídos de la Tabla 5.2.
(4) Obtenidos de dividir t_e (ejecución operación) por su factor αi (datos en Tabla 5.1), pues existen defectuosos.
(5) Ver Tabla 5.4.

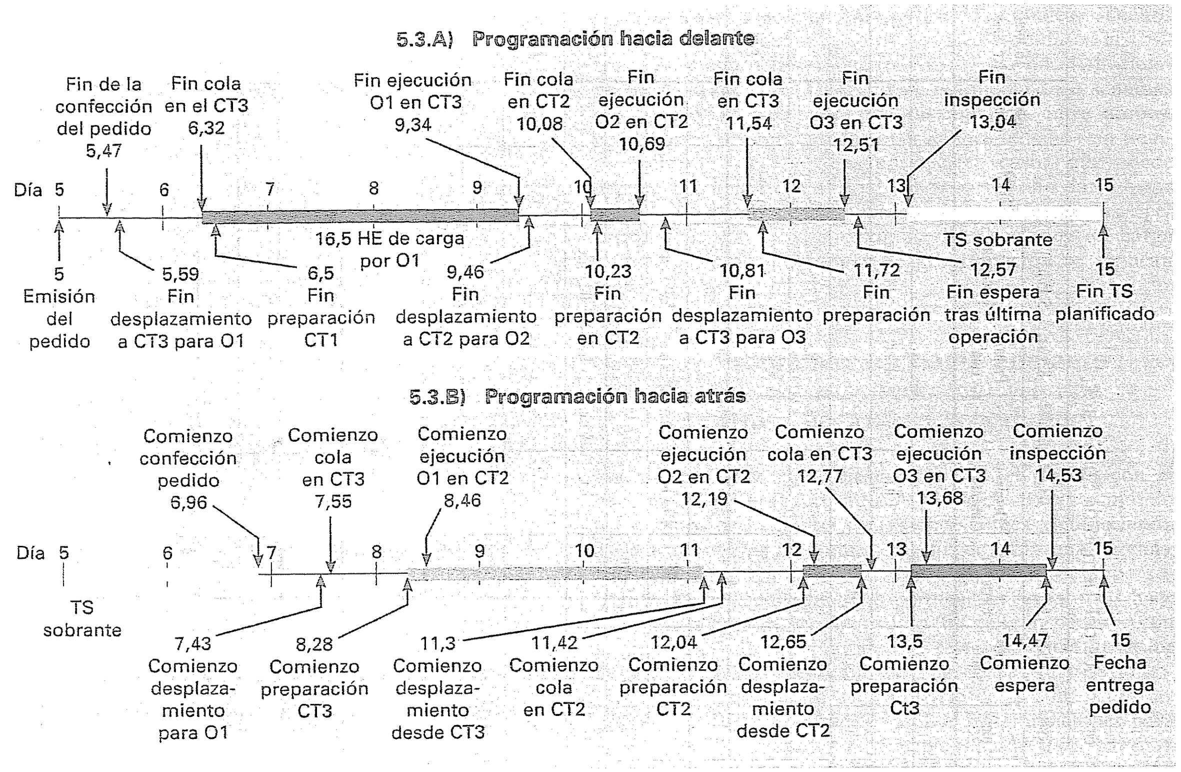


Figura 5.3. Programación hacia delante y hacia atrás de un lote de 186 unidades de P2 a emitir al final del día 5.

Tabla 5.17 sean fácilmente utilizables para cualquier fecha de comienzo). Los datos de carga se extraen de la Tabla 5.16, expresándolos en horas estándar (ver 5.A.1 para P1).

A partir de la Tabla 5.17 se elabora la 5.18, colocando las cargas periodificadas de forma similar a la empleada en el procedimiento simplificado (ver Ejemplo 5.1). Para cada pedido, la carga que genera cada operación se colocará dentro de la fila del ítem a que se refiere el correspondiente CT y en el período en que se produce según la programación realizada, acumulándose cuando varias coincidan en la misma semana. Para ilustrar el proceso calcularemos la distribución para dos lotes concretos.

El lote de 135 unidades del ítem 112, que se emite al final del día 5, generará las siguientes cargas:

- *En CT1 y en el período 2:* todas las comprendidas entre las fechas 5 y 10, es decir (ver Tabla 5.17 sumándole 5 a las fechas finales para que el comienzo sea en 5): 1 h.e. entre 5,91 (5 + 0,91) y 6,03 (5 + 1,03) y 11,25 h.e. entre 6,03 y 7,41 (5 + 2,41) = 12,25 h.e.
- *En CT2 y período 2* (procediendo análogamente): 11,12 h.e. (1 + 10,12 entre las fechas 8,08 y 9,79).
- *En CT1 y período 3:* 9,64 h.e. (1 + 8,64 entre las fechas 10,21 y 11,4).

Para el lote de 222 unidades del ítem 112, a emitir al final del día 10, tendremos:

- *En CT1 y período 3:* 19,5 h.e. (1 + 18,5 entre las fechas 10,03 y 13,3). Esta carga se acumulará a las 9,64 h.e. generadas en el mismo período por el pedido anterior, dando las 29,14 h.e. que aparecen en la Tabla 5.18.
- *En CT2, períodos 3 y 4:* 17,68 h.e. que pertenecen a dos periodos (comienzo: 13,97, final: 16,69) y que distribuiremos uniformemente. De acuerdo con ello, el 37,87 por 100 [(15 − 13,97)/(16,96 − 13,97)] de la misma (=6,68 h.e.) corresponderá a la semana 3 y el resto (10,97 h.e.) a la semana 4.
- *En CT1, período 4:* 15,21 h.e. (1 + 14,21 entre 17,11 y 18,98).

En la Tabla 5.18 aparecen resaltadas las cargas cuya acumulación se ha completado en los cálculos realizados más arriba.

Tabla 5.17. Programación hacia delante y cargas en CT para los diferentes tamaños de lote de P1, P2, 112 y 121

ITEM	P1			P2			112			112			112			121		
Lote a emitir	186			113			135			222			357			264		
Lote a obtener	170			100			113			186			299			226		
Conceptos	CT*k*	Carga	Fecha final	CT*k*	Carga	Fecha final	CT*k*	Carga	Fecha final	CT*k*	Carga	Fecha final	CT*k*	Carga	Fecha final	CT*k*	Carga	Fecha final
Comienzo			0			0			0			0			0			0
Confec. del Pedido			0,47			0,47			0,47			0,47			0,47			0,47
Desplazamiento	CT3 (O1)		0,59	CT3 (O4)		0,52	CT1 (O7)		0,54	CT1 (O7)		0,54	CT1 (O7)		0,54	CT2 (O9)		0,56
Cola en CT*k*			1,32			1,25			0,91			0,91			0,91			1,18
Preparación *Oi*		1	1,5		1	1,44		1	1,03		1	1,03		1	1,03		1	1,33
Ejecución *Oi*		15,5	4,34		9,42	3,16		11,25	2,41		1,85	3,3		29,5	4,68		8,8	2,69
Desplazamiento	CT2 (O2)		4,46	CT2 (O5)		3,28	CT2 (O7)		2,47	CT2 (O8)		3,36	CT2 (O8)		4,74	CT1 (O10)		2,78
Cola en CT*k*			5,08			3,9			3,08			3,97			5,35			3,15
Preparación *Oi*		1	5,23		1	4,05		1	3,24		1	4,13		1	5,5		1	3,27
Ejecución *Oi*		2,94	5,69		4,47	4,74		10,12	4,79		16,65	6,69		26,77	9,62		4,68	3,84
Desplazamiento	CT3 (O3)		5,81	CT3 (O6)		4,86	CT1 (O9)		4,85	CT1 (O9)		6,75	CT1 (O9)		9,68			
Cola en CT*k*			6,54			5,59			5,22			7,11			10,05			
Preparación *Oi*		1	6,72		1	5,77		1	5,34		1	7,24		1	10,17			
Ejecución *Oi*		4,32	7,51		0,85	5,93		8,64	6,4		14,21	8,98		22,85	12,97			
Espera			7,57			5,99			6,64			9,03			13,03			3,9
Inspección			8,04			6,46			6,93			9,51			13,5			4,37

A las cargas que aparecen en la Tabla 5.18 habrá que añadir la de los pedidos pendientes, al igual que hicimos en el método simplificado. Las cargas correspondientes se calculan de forma análoga a la empleada con los pedidos planificados, tomando como fecha de emisión el momento 0 y programando, a partir de ahí, el tiempo que le resta a la operación en curso, así como el resto de los elementos de TS hasta concluir la inspección del lote. Las cargas obtenidas aparecen en la Tabla 5.19 y no coinciden exactamente con las obtenidas con el procedimiento simplificado (Tabla 5.8). Sumando las cargas de las Tablas 5.18 y 5.19 obtenemos el plan CRP detallado que aparece en la Tabla 5.20; las desviaciones se hallan de forma análoga a la empleada para la Tabla 5.9.

Tabla 5.18. Cargas generadas en los Centros de Trabajo por los Pedidos Planificados

	Conceptos \ Períodos	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
(1)	Pedidos Planificados de P1	186		186		186		186		186			
(2)	Pedidos Planificados de P2		113		113		113	113		113	113		
(3)	Pedidos Planificados de 112	135	222	135	357		357	135					
(4)	Pedidos Planificados de 121		264		264	264		264	264				
CT1	Carga por P1 (1)												
	Carga por P2 (2)												
	Carga por 112 (3)		12,25	29,14	27,46	40,14		54,35	12,25	33,49			
	Carga por 121 (4)			5,68		5,68	5,68		5,68	5,68			
	CARGA TOTAL EN CT1		12,25	34,82	27,46	45,82	5,68	54,35	17,93	39,17			
CT2	Carga por P1 (1)			3,94		3,94		3,94		3,94		3,94	
	Carga por P2 (2)			5,47		5,47		5,47	5,47		5,47	5,47	
	Carga por 112 (3)		11,12	6,68	22,09		27,77		38,89				
	Carga por 121 (3)			9,8		9,8	9,8		9,8	9,8			
	CARGA TOTAL EN CT2		11,12	25,89	22,09	19,21	37,57	9,41	54,16	13,74	5,47	9,41	
CT3	Carga por P1 (1)		16,5	5,32	16,5	5,32	16,5	5,32	16,5	5,32	16,5	5,32	
	Carga por P2 (2)			10.42	1,85	10,42	1,85	10,42	12,27	1,85	10,42	12,27	1,85
	Carga por 112 (3)												
	Carga por 121 (4)												
	CARGA TOTAL EN CT3		16,5	15,74	18,35	15,74	18,35	15,74	28,77	7,17	26,92	17,59	1,85

Tabla 5.19. Carga generada en los Centros de Trabajo por los Pedidos en Curso

	Períodos	1	2	3
P1	Pedidos en curso		170	
	Carga en CT1			
	Carga en CT2			
	Carga en CT3	3		
P2	Pedidos en curso		100	
	Carga en CT1			
	Carga en CT2	5,47		
	Carga en CT3	5,85		
112	Pedidos en curso		113	186
	Carga en CT1	19,3	7,35	
	Carga en CT2	18,65		
	Carga en CT3			
121	Pedidos en curso		226	
	Carga en CT1	5,68		
	Carga en CT2	8		
	Carga en CT3			

5.A.4. Interpretación de los resultados y comparación con el método simplificado

La diferencia entre las cargas totales en cada CT, obtenidas por uno y otro métodos, es insignificante (1,54 h.e. en el CT1; 0,14 h.e. en el CT2, y 0,03 h.e. en el CT3). Sin embargo, si existe una variación importante en cuanto a la distribución de ésta por períodos. De hecho, si comparamos la Tabla 5.19 con la 5.20, podremos comprobar que en el proceso simplificado todas las desviaciones semanales son positivas, lo que nos llevaría a afirmar que el Plan de Pedidos es viable en su configuración actual. Por el contrario, si observamos el Plan CRP obtenido por el procedimiento detallado, veremos que hay semanas en las que las desviaciones son negativas. Si éstas son pequeñas (por ejemplo, las 5,02 h.e. del período 5 en el CT1) no se invalidaría el Plan de Pedidos, pues podrían ser corregidas fácilmente:

- Desplazando el comienzo de alguna operación en el tiempo (en el caso mencionado, el TS planificado para el lote es de tres semanas, mientras el tiempo programado es de 6,93 días).

Tabla 5.20. Plan CRP obtenido mediante el procedimiento detallado

CT*k*	Conceptos \ Períodos	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
CT1	Carga por P1												
	Carga por P2												
	Carga por 112	19,3	19,6	29,14	27,46	40,14		54,35	12,25	33,49			
	Carga por 121	5,68		5,68		5,68	5,68		5,68	5,68			
	CARGA TOTAL EN CT1 (A)	24,98	19,6	34,82	27,46	45,82	5,68	54,35	17,93	39,17			
	CAPACIDAD DISPONIBLE (B)	40,8	40,8	40,8	40,8	40,8	40,8	40,8	40,8	40,8	40,8	40,8	40,8
	DESVIACION (B-A)	15,82	21,2	5,98	13,34	−5,02	35,12	−13,55	22,87	1,63	40,8	40,8	40,8
CT2	Carga por P1 (1)			3,94		3,94		3,94		3,94		3,94	
	Carga por P2 (2)	5,47		5,47		5,47		5,47	5,47		5,47	5,47	
	Carga por 112 (3)	18,65	11,12	6,68	22,09		27,77		38,89				
	Carga por 121 (3)	8		9,8		9,8	9,8		9,8	9,8			
	CARGA TOTAL EN CT2 (C)	32,12	11,12	25,89	22,09	19,21	37,57	9,41	54,16	13,74	5,47	9,41	
	CAPACIDAD DISPONIBLE (D)	32,5	32,5	32,5	32,5	32,5	32,5	32,5	32,5	32,5	32,5	32,5	32,5
	DESVIACION (D-C)	0,38	21,38	6,61	10,41	13,29	−5,07	23,09	−21,66	18,76	27,03	23,09	32,5
CT3	Carga por P1 (1)	3	16,5	5,32	16,5	5,32	16,5	5,32	16,5	5,32	16,5	5,32	
	Carga por P2 (2)	5,85		10,42	1,85	10,42	1,85	10,42	12,27	1,85	10,42	12,27	1,85
	Carga por 112 (3)												
	Carga por 121 (4)												
	CARGA TOTAL EN CT3 (E)	8,85	16,5	15,74	18,35	15,74	18,35	15,74	28,77	7,17	26,92	17,59	1,85
	CAPACIDAD DISPONIBLE (F)	27,25	27,25	27,25	27,25	27,25	27,25	27,25	27,25	27,25	27,25	27,25	27,25
	DESVIACION (F-E)	18,4	10,75	11,51	8,9	11,51	8,9	11,51	−1,52	20,08	0,33	9,66	25,4

- Realizando algunas horas extras, para lo que tendremos que considerar la Capacidad Práctica Máxima[30] (en nuestro caso, esta opción no parece muy adecuada dada la enorme capacidad ociosa del CT en el horizonte contemplado).

En otras ocasiones, las desviaciones negativas alcanzan valores bastante más significativos, por ejemplo, 13,55 (33,2 por 100 de la capacidad semanal disponible) en el período 7 en el CT1 o 21,66 (66,6 por 100) del período 8 en CT2). Una opción adecuada para solucionar dicho problema puede ser adelantar la emisión del pedido en cuestión, con lo que las fechas de entrega previstas y, por tanto, los Pedidos Planificados de todos los items de nivel superior, seguirían siendo válidas (por ejemplo: emitir el pedido de 357 unidades de 112 en la semana 5 y no en la 6). Con ello, las desviaciones pasarían a ser de 4,62, 16,95, −0,98 y 25,48 h.e. en las semanas 6, 7, 8 y 9, respectivamente, en el CT1 y de −4,68 y 6,04 h.e. en las semanas 7 y 8, respectivamente, en el CT2). Para que en posteriores replanificaciones no se cambiara la nueva fecha de emisión, este pedido deberá hacerse firme (ver Apartado 4.6) en la semana señalada. Además, sería necesario replanificar y comprobar los efectos que ello tendría sobre los pedidos planificados de los componentes de niveles inferiores que se vean afectados (en nuestro caso, por ejemplo, es posible que fuera necesario adelantar algún pedido de los items 211 o 212).

[30] Ver Capítulo 2.

REFERENCIAS Y BIBLIOGRAFIA

ADAM-EBERT: «Production and Operations Management. Concepts, Models and Behavior». Prentice Hall. 1992.

BEDDICK, J. F.: «Elements of Success MRP implementation», Production and Inventory Management, segundo trimestre, 1983.

BELT, B.: «Integrating Capacity planning and Capacity Control», *Production and Inventory Management*, vol. 17, núm. 1, 1976.

BERGER, A. W.: «Successful MRP Instalation the First Time», 20th Annual Intern. Conference Proceed., APICS, 1977.

BLOOD, BARRY, MCLEMORE Y TRAVIS: «How to Improve the Effectiveness of Your Manufacturing Resource plan», 30th Annual Int. Conference, Proceed., APICS, 1987.

BOURKE, R. W.: «Education Enhancement and Training Tips», 31st Annual Intern. Conference Proceedings, APICS, 1988.

BROWNE, HARHEM, SHIVNAN: «Production Management Systems: A CIM Perspective». Addison-Wesley Publishing Co., 1988.

BUKER, D. W.: «Ten Steps to Class A MRP II», 30th Annual Internat. Conference Proceedings, APICS, 1987.

DAVENPORT, FREDERICK J.: «Financial Management Through MRP», Production and Inventory Management, segundo trimestre 1983.

DUNN, ALAN G.: «Managing the Training Effort», Planning and Control Seminar Proceed., APICS, 1982.

EDELMAN, M. P.: «Embracing of JIT by the Masses, Far Better Than MRP II and For Good Reason», 30th Annual Intern. Conference Proceedings, APICS, 1987.

FISHER, KENNETH R.: «How to implement MRP Successfuly», Production and Inventory Management, cuarto trimestre, 1981.

FOLEY, M. J.: «Aires de cambio para los usuarios de MRP II», *Datamation*, núm. 37, 1988.

GAITHER, N.: «Production and Operations Management». The Dryden Press, 1992.

GARCÍA GONZÁLEZ, S.: «La implementación como clave del éxito en los sistemas MRP: propuesta de un Plan», *Alta Dirección*, núm. 157, 1991.

GARCÍA GONZÁLEZ, S.: «Los Sistemas MRP Evolucionados, aportaciones al subsistema financiero», Universidad de Sevilla, 1992.

GARVIN, D. A.: «Operations Strategy. Text and Cases». Prentice Hall, 1992.

GRAY, C. D.: «The Right Choice. A Complete Guide to Evaluating, Selecting & Installing MRP II Software», Oliver Wight Lted. Public., 1987.

GUPTA, J. M. D.: «Management Science Implementation, Experiences of a Practicing O. R. Manager», *Interfaces*, vol. 7, mayo 1977.

JARKON-NANDA: «Resource Requirements Planning Achieves Production Goals For Non-Profit Organizations», *Industrial Engineering*, vol. 17, núm. 10, octubre 1985.

KAMENETZKY, RICARDO D.: «Successful MRP II Implementation Can Be Complemented By Smart Scheduling Sequencing Systems», *Industrial Engineering*, vol. 17, número 10, 1985.

KNEPPELT, L. R.: «Implementing Manufacturing Resource Planning/Difficulty of the Task», *Production and Inventory Management*, vol. 22, núm. 2, segundo trimestre 1981.

LAFORGESTURR: «MRP Practices in a Random Sample of Manufacturing Firms», *Production and Inventory Management*, vol. 27, núm. 3, 1986.

LEIMAINS, ERIKS: «How to Set Up An In-House Education Program», 31st Annual Intern. Confer. Proceed., APICS. 1988.

LUCAS, N. C.: «Why Information Systems Fail». Columbia University Press, 1975.

MACHUCA, J. A. D., y GARCÍA, S.: «Del MRP al MRP II, Evolución, descripción y precisión conceptual», Alta Dirección, núm. 155, 1991.

MARTEL-ANGER: «Repair Remanufacturing MRP II in the Armed Services, Implementation and Management Issues», 33rd International Conference Proceedings, APICS, 1990.

MAY, NEVILLE: «The Major Issues of Capacity Requirements Planning», APICS Logistics Conf. and Tech. Exhibits, 1987.

MELNYK-GONZÁLEZ: «MRP II, the Early Returns Are In», *Production and Inventory Management*, primer trimestre, 1985.

MCLAIN-THOMAS-MAZZOLA: «Operations Management. Production of Goods and Services». Prentice Hall, 1992.

MILLARD, R.: «MRP Is none of the above», *Prod. and Inv. Management*, vol. 26, núm. 1, 1985.

MONTOLLONCH: «Paquetes de aplicación en el área de producción», *Chip*, núm. 13, abril 1982.

MORRIS, W. T.: «Implementation Strategies for Industrial Engineers». Grid, Columbus, 1979.

ORLICKY, J.: «Materials Requirements Planning». McGraw-Hill Inc., 1975.

PLOSSL, W.: «Production and Inventory Control Applications». George Plossl Educational Services Inc., 1983.

PLOSSL, WIGHT: «Capacity planning and control», *Production and Inventory Management*, vol. 14, núm. 3, 1973.

QUINGLEY, P. E.: «Pre-MRP. Planning-Part One, Make these 3 tests Before Implementing», *Industrial Engineering*, vol. 12, febrero 1980.

ROUT, W.: «In Praise of the Informal System», *Production and Inventory Management*, vol. 20, núm. 4, 1979.

RUHL, JOHN: «MRP and Purchasing at Steelcase», 19 Annual Internation, Conference Proceed., APICS, 1975.

SAEZ GUTIÉRREZ: «Contabilidad de Costes», tomo I, *Manuales de la UNED*, 1982.

SAVAGE y WILLIAM: «Managerial Changes, Not Just Technology, Equals Success», 31st Annual Intern. Conference Proceed., APICS, 1988.

SCOTT, B.: «Manufacturing Planning Systems». McGraw-Hill, 1994.

SCHORR, JOHN E.: «Computer to Computer Purchasing», 31st Annual Intern. Conference Proceed., APICS, 1988.

SCHROEDER, R. G.: «Administración de Operaciones». McGraw-Hill, 1992.

SCHROEDER-ANDERSON-WHITE-TUPY: «Materials Requirements planning: A Study of Implementation and Practice», APICS, 1981.

SCHULTZS-LEVIN: «Implementing Operations Research/ Management Science». American Elsevier, 1975.

SUM y YANG K.: «A study of MRP II practices in Singapore», Omega, vol. 21, núm. 2, 1993.

STEWART, GEORGE D.: «Record Accuracy - the Possible Dream», Inventory Planning Seminar Proceedings, APICS, 1979.

WACKERS-HILL: «The Key to Success or Failure of MRP, Overcoming Human Resistance», *Production and Inventory Management*, vol. 18, núm. 4, 1977.

WALLACE, T. F.: «APICS Dictionary», APICS, 1984.

WALLACE, T. F.: «MRP II, Making It Happen». Oliver Wight Ltd. Publ. Inc, 1985.

WALLACE, T. E.: «New Developments in Manufacturing Strategy», 31st Annual Intern. Conference Proceedings, APICS, 1988.

WEMMERLÖV, U.: «A Note on Capacity planning», *Production and Inventory Management*, vol. 21, núm. 3, 1980.

WHITE, RICHARD W.: «Is It time for a Physical Exam of Your MRP System?», *Production and Inventory Management*, vol. 27, núm. 3, 1986.

WHITE, ANDERSON, SCHROEDER, TUPY: «A Study of MRP Implementation Process», *Journal of Operations Management*, vol. 2, núm. 3, mayo 1982.

WIGHT, OLIVER W.: «The Odds Are 20 to 1, PICS Won't For You», Newsletter, núm. 8, Newbury, N. Y. Inc., 1975.

WIGHT, OLIVER W.: «MRP II», Modern Materials Handling, septiembre, 1979.

WIGHT, OLIVER W.: «MRP II, Unlocking America's Productivity Potential», CBI Publishing Co., 1981.

WIGHT, OLIVER W.: «The Executive's Guide to Successful MRP II». Prentice Hall, 1982.

WYSOCKY, R. K.: «OR/MS Implementation Research: A Bibliography», *Interfaces*, vol. 9, febrero 1979.

CAPITULO 6

LA FILOSOFIA «JUSTO A TIEMPO» (I): INTRODUCCION, PLANIFICACION Y CONTROL

6.1. INTRODUCCION

Es un hecho admitido que en la década de los setenta se inicia una serie de transformaciones en el entorno empresarial que rompió su relativa estabilidad. De entre las características fundamentales de este cambio ambiental podríamos destacar las siguientes:

- A nivel de mercado la competencia se hace cada vez más dura, por lo que las empresas tienen que esforzarse para no perder sus posiciones en el mismo. Además, la calidad se convierte en un requerimiento fundamental del cliente y en una de las principales armas competitivas.
- A nivel de producto se demanda mayor variedad y mejores prestaciones, a la vez que se acorta significativamente el ciclo de vida de los mismos[1].
- Se avanza rápidamente en investigación y desarrollo, con lo cual el riesgo de obsolescencia tecnológica es cada vez mayor.
- A partir de la crisis del petróleo (1973) los costes de los recursos productivos en general y de los energéticos en particular sufren rápidos incrementos, lo que obliga a las empresas a un exhaustivo control de los mismos.

A este ambiente turbulento vino a sumarse en estos años setenta una verdadera invasión de productos japoneses (principalmente automóviles y componentes electrónicos) que basaban su competencia en una buena calidad y en bajos precios; ello provocaba una admiración temerosa en el empresariado occidental: admiración por el propio fenómeno en sí mismo y temor por la impotencia inicial para reaccionar y conservar los mercados. Efectivamente, al intentar basar su estrategia en el liderazgo en costes, las empresas occidentales habían accedido a sistemas de fabricación en masa altamente especializados en cuanto a mano de obra y equipos, por lo que ahora se encontraban con una estructura demasiado rígida para dar una respuesta rápida a los cambios que sufría el mercado. Al desconcierto inicial contribuyó en cierta medida la creencia que atribuía el denominado «milagro japonés» a factores sociales y culturales, endógenos del país nipón, con lo que dejaba pocas puertas abiertas a la esperanza. Estudios más detallados realizados a comienzos de los ochenta comenzaron a destruir parte de los mitos a los que se atribuía el éxito de las empresas japonesas, basando el mismo en una nueva visión de la dirección de empresas y a un mayor énfasis en el papel que desempeña el Subsistema de Producción en la consecución de la

[1] Ver J. A. D. Machuca y otros (1994, Capítulo 4).

ventaja competitiva (ver Cuadro 6.1). En general se empezó a comprender que, mientras las empresas occidentales habían estado preocupadas por conseguir nuevos mercados y construir la fábrica del futuro, las empresas japonesas habían dedicado sus esfuerzos a mejorar la fábrica del presente. Fue entonces cuando se empezó a hablar de la Filosofía «Justo a tiempo» (JIT) y del sistema Kanban (a veces empleados erróneamente como sinónimos) como una nueva orientación de las labores productivas de la empresa, que, si bien tenía su origen en Japón, podía ser exportado con éxito a los países occidentales. Muy pronto, empresas como Motorola, Sony, General Motors, etc., se ocuparon de demostrar con sus buenos resultados que, efectivamente, la aplicación de estas técnicas era posible en las empresas occidentales, lo que desató un gran interés por su conocimiento.

En el presente capítulo se expondrán los objetivos del JIT, así como los métodos de planificación, ejecución y control de la producción empleados para conseguir fabricar justo lo necesario en el momento necesario. Sin embargo, la fabricación «Justo a tiempo» resultaría imposible si la planta y los métodos de producción no estuviesen diseñados adecuadamente. A analizar estos aspectos dedicaremos el Capítulo 7.

Cuadro 6.1. El éxito japonés: mitos y realidades

La filosofía «Justo a tiempo» nace y se desarrolla en un determinado ambiente socioeconómico y cultural, lo que hace interesante su análisis. Sin embargo, ciertos estudios realizados han desterrado, en parte, algunos mitos a los que durante algún tiempo se les atribuyó, en exclusiva, el éxito de las empresas japonesas, ayudando de esta forma a aclarar que la aplicación del JIT en Occidente es factible.

1. Las empresas japonesas son modernas estructuras colmadas de equipos sumamente complejos.

Las visitas de profesores y directivos de Occidente (Hayes, 1982) a las empresas japonesas demostraron que su grado de complejidad tecnológica era, como mucho, similar a las instalaciones estadounidenses. Además, tampoco era cierto que los japoneses hiciesen trabajar más tiempo y más rápido a estos equipos; en realidad se prefiere trabajar por debajo de la capacidad máxima de las máquinas para eliminar posibles averías.

2. Existencia de unas normas de carácter general sobre la retribución de los empleados.

Hoy en día sabemos que los sistemas salariales japoneses son cada vez más parecidos a los occidentales. Aunque en ellos sigue primando la antigüedad del empleado, va aumentando el número de empresas que determinan el salario por rendimiento y por valoración del puesto. De esta forma, ya en 1980, el 80,6 por 100 de las empresas japonesas había incluido la valoración del puesto de trabajo en la determinación del salario y otro 13,8 por 100 de ellas lo hacía sólo en base a los puestos y a la capacidad del empleado. Además, las dos gratificaciones anuales, que antes se recibían en función de los beneficios de las empresas, son ya negociadas *a priori* en el contrato de trabajo, considerándose como pagas extraordinarias y, por tanto, parte del sueldo del empleado (Takayanagi, 1989, página 69).

3. Empleo de por vida en todas las empresa japonesas.

Aunque es cierto que el empleo de por vida se intenta como estrategia directiva, entre otras razones para rentabilizar el gran gasto en formación que realizan las empresas japonesas, no es menos cierto que la mayoría de ellas no reúne las condiciones de estabilidad suficiente para realizar este tipo de contratos. Se estima que sólo las grandes firmas y los organismos gubernamentales realizan esta práctica de forma habitual. Además, estas grandes empresas diluyen las consecuencias del empleo de por vida al utilizar gran número de trabajadores temporales que contratan por meses o años.

4. Utilización en las empresas japonesas de un ritmo de trabajo vertiginoso.

Son muchos los observadores y estudiosos de las empresas japonesas (Hayes, 1982; Dore, 1973, y Weiss, 1985) que indican que el ritmo de trabajo en éstas no es superior al utilizado en las empresas occidentales.

Así pues, el éxito japonés no se puede fundamentar en exclusiva en los aspectos anteriores sino, como comentaremos seguidamente, en la forma de entender la dirección y gestión del Subsistema de Operaciones: dan más énfasis a la filosofía de dirección que al empleo de técnicas concretas, saben llegar a los distintos niveles de la empresa y hacen que todos asuman los objetivos como suyos y, por último, no trabajan más, sino que lo hacen más coherentemente. Mientras en Occidente se trabajó en mejorar la comercialización, allí se trabajó en mejorar la producción. No pensaban en la fábrica del futuro, sino en la del presente (un producto bueno y barato se vende solo). Además, dan igual importancia a todas las fases del diseño del Subsistema Productivo. Algunas **razones básicas que sí pueden explicar el éxito japonés** son las siguientes:

1. Contratación selectiva del personal

La mayoría de las empresas japonesas contratan a sus empleados cualificados con criterios muy selectivos. Para ello suelen mantener relaciones estrechas con las Universidades y otras Instituciones Educativas de las que se nutren de personal. Ello redunda posteriormente en grandes beneficios para la empresa a través de las mejoras que los propios trabajadores proponen (ver Capítulo 7, Apartado 7.4).

2. Políticas de promoción y evaluación

Son políticas lentas que buscan, como objetivo prioritario y siempre que ello sea posible, que los puestos vacantes sean ocupados por promociones de trabajadores internos a la organización. Se prima en ellas la antigüedad y la cualificación del empleado. Todo ello ayuda a crear un ambiente relajado y cooperante entre los trabajadores, nada parecido a los sentimientos de angustia y competencia que experimentan los trabajadores occidentales (Takayanagi, 1989, pág. 66).

3. Sistema de rotación de los puestos de trabajo. Polivalencia de los trabajadores

Los trabajadores japoneses son adiestrados en los distintos puestos de su área hasta convertirlos en obreros polivalentes (ver Capítulo 7, Apartado 7.3). Una vez conseguida esta polivalencia desempeñarán de forma rotativa estos trabajos.

4. Sistema de toma de decisiones compartidas

Siempre que ello sea posible, en las empresas japonesas se intentará que en la toma de decisiones participen todos aquellos que posteriormente se verán afectados por las mismas (principalmente en la decisiones operativas). Este procedimiento, que tiene el inconveniente de su lentitud, ofrece la ventaja de acrecentar el apoyo a la decisión tomada y aumentar el esfuerzo de todos para su consecución.

5. Equipos de producción no sobrecargados

Es normal que los equipos de producción no sean utilizados al 100 por 100 de su capacidad. Con ello intentan evitar los atascos y las averías, tan perjudiciales para el buen desarrollo de la producción, y alargar la vida útil del equipo.

6. Centros de trabajo limpios y ordenados.

Existe un principio japonés que dice así: «Si se limpia el suelo de la fábrica, se limpian también los procesos mentales de las personas que allí trabajan». Aparte de lo anterior, son claras las repercusiones positivas que un equipo de trabajo limpio y bien mantenido puede tener sobre aspectos tan fundamentales como la calidad de los productos y el buen funcionamiento de la maquinaria.

7. Ausencia casi total de inventarios en las plantas de fabricación

Los empresarios japoneses consideran cualquier política que obligue a mantener inventarios como una política de confort que hay que abandonar, ya que éstos, además de ser extraordinariamente gravosos para la empresa, impiden descubrir los problemas reales de la misma y avanzar en su resolución definitiva (ver Apartado 6.2).

8. Motivación del personal

El trabajador japonés suele ser más participativo que el occidental y, además, se siente como parte fundamental de su empresa. Ello no sólo proviene de la idiosincrasia japonesa, sino que está potenciado por una nueva visión de los empresarios japoneses sobre la Gestión de los Recursos Humanos, viendo en éstos el mayor capital de la empresa y considerándolos como parte fundamental en la consecución de beneficios. A todo ello hay que añadir el gran gasto social realizado por las empresas japonesas (hospitales, guarderías, viviendas, lugares recreativos, etc.).

9. Nivel máximo de calidad

En Japón todos los trabajadores luchan contra un enemigo común: los defectos, llegando a sentirse orgullosos de descubrirlos por el ahorro de costes que le supondrá a su empresa. Además, por parte de la Dirección, se emplea plenamente el concepto de calidad global (Capítulo 11), estando convencidos de que la calidad no se inspecciona, sino que se crea (ver Capítulo 7, Apartado 7.5).

10. Estrecha relación con los proveedores

Las empresas japonesas consideran a sus proveedores como el inicio de su proceso productivo, por lo que ven como imprescindible la colaboración con ellos si ambos quieren triunfar en el destino común que les une (ver Capítulo 7, Apartado 7.7).

6.2. OBJETIVOS Y ELEMENTOS DE LA FILOSOFIA «JUSTO A TIEMPO»

A nuestro juicio, los objetivos y estrategias asumidos por el JIT se derivan, en gran medida, del intento de acomodar la gestión de empresas a las características propias del país donde ve la luz. Japón es un país de 123.000.000 de habitantes con una superficie de 369.883 km² (más de cuatro veces la densidad de población española). Evidentemente, cualquier espacio utilizado que no aporte valor añadido (por ejemplo almacenaje) es un claro despilfarro, y el efecto de un cliente insatisfecho por mala calidad puede multiplicarse rápidamente. Además, Japón se caracteriza por la escasez de recursos naturales, situación que se vio agravada con la destrucción sufrida en la Segunda Guerra Mundial, lo cual obligó a tener un especial cuidado en evitar el despilfarro de factores de producción. En este contexto, no es de extrañar que el **JIT** nazca como un *nuevo enfoque en la Dirección de Operaciones* de la empresa. *Este pretende que los clientes sean servidos justo en el momento preciso, exactamente en la cantidad requerida, con productos de máxima calidad y mediante un proceso de producción que utilice el mínimo inventario posible y que se encuentre libre de cualquier tipo de despilfarro o coste innecesario.* Con ello se contribuye a aumentar la productividad global de la empresa y a mejorar el rendimiento sobre la inversión efectuada (ROI)[2].

Como podrá comprobarse a lo largo de las páginas que siguen, *el «Justo a tiempo» es algo más que un método de planificación y control de la producción*, incidiendo en aspectos tan variados como el diseño del producto, la organización del proceso productivo, la consideración de la mano de obra, los métodos de ejecución física del producto o el control de calidad del mismo. Por todo ello *es considerado como una verdadera Filosofía*. Además, por lo utópico de sus metas, el JIT debe ser considerado *como un proceso de mejora continua*, donde diariamente se aborden cambios en la empresa para diseñar las condiciones óptimas de la fabricación «Justo a tiempo».

En resumen, podemos decir que el JIT acomete todo proceso de fabricación con dos estrategias básicas:

- *Eliminar toda actividad innecesaria o fuente de despilfarro*, por lo que intenta desarrollar el proceso de producción utilizando un mínimo de personal, materiales, espacio y tiempo.
- *Fabricar lo que se necesite, en el momento en que se necesite y con la máxima calidad posible.*

Georges Archier y Hervé Seryex, con su *teoría de los cinco ceros*, hacen una sistematización de las metas planteadas en una fabricación «Justo a tiempo», de forma que la eficacia de las labores de producción se pueden medir por su grado de acercamiento a aquéllas. Estas son resumidas en el Cuadro 6.2 (J. A. D. Machuca y P. Luna, 1990, pág. 504).

[2] Cómo puede observarse, la fabricación «Just-in-Time» se convierte en la alternativa de la fabricación «Just-in-case» (fabricar «por si acaso»), la cual prefiere anticipar la fabricación a las necesidades reales, manteniendo inventarios para asegurar tal anticipación y hacer frente a las posibles irregularidades de la demanda.

Cuadro 6.2. La teoría de los cinco ceros de Archier y Seryex (1984)

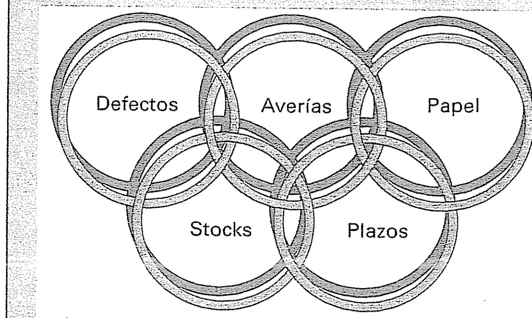


Figura 6.1. Los cinco ceros perseguidos en el JIT.

◦ Cero defectos

La calidad bajo la filosofía «Justo a tiempo» significa un proceso de producción sin defectos en el que ésta se incorpora al producto cuando se fabrica. Se parte de un concepto de calidad total, incorporando ésta desde la etapa de diseño del producto y continuando en su proceso de fabricación. No es de extrañar que una filosofía que busca la eliminación de cualquier coste innecesario luche por eliminar los costes adicionales de una mala calidad: costes por reproceso y rectificación, por errores administrativos que hay que corregir, por asistencia posventa, por productos inservibles, por las devoluciones a proveedores, por stocks de seguridad, por pérdida de rendimiento, por pérdida de imagen de la empresa y por el control «policial». Además, las mismas condiciones que favorecen un proceso de fabricación libre de defectos vienen a aumentar su productividad. La evidente relación entre productividad y calidad estriba, simplemente, en que «menos defectos» significa «más producción», sin el correspondiente incremento en los costes.

En la fabricación «Justo a tiempo» se utilizan máquinas que producen piezas de calidad uniforme, se concierta una calidad del 100 por 100 con los proveedores, se crean programas participativos con incentivos que promuevan mejoras de la calidad, se emplean programas permanentes de mantenimiento preventivo, y, por último, se lleva a cabo una comprobación continua de la línea de producción mediante sistemas automáticos y por el propio personal de la factoría.

◦ Cero averías (o cero tiempo inoperativo)

En una empresa que pretenda servir a sus clientes justo en el momento necesario y justo en la cantidad requerida, y todo ello sin mantener inventarios, es lógico que cualquier avería de la maquinaria sea considerada como algo «diabólico» que puede provocar el incumplimiento de los objetivos. La lucha contra las averías y el tiempo improductivo se facilita mediante la elección de una distribución en planta adecuada, con programas permanentes y muy exigentes de mantenimiento productivo y con un personal polivalente, bien formado y motivado. Por otra parte, en el JIT, el adiestramiento del trabajador es una práctica generalizada para poder solventar los pequeños problemas que, con frecuencia, se presentan en el curso de la jornada de trabajo: tareas ordinarias de mantenimiento, supervisar y ajustar los equipos, buscar continuamente formas y modos de eliminar las potenciales interrupciones, etc. La finalidad perseguida con todo ello es muy simple: evitar cualquier retraso por fallo de los equipos durante las horas de trabajo.

◦ Cero stocks

Si recurrimos a la famosa analogía que compara a la empresa con un barco que navega tranquilamente por un río plagado de rocas (problemas), un nivel adecuado de los inventarios (nivel del agua), podrá conseguir que la empresa (navegue) plácidamente. Sin embargo, la filosofía «Justo a tiempo» lucha contra cualquier política de empresa que implique mantener altos inventarios, al considerar a los stocks como el derroche más dañino, como la estrategia de confort que hay que empezar a abandonar ya que, además de los costes que implican (ver Capítulo 1, Apartado 1.4.2.2), vienen a disimular diversos problemas, tales como: incertidumbre en las entregas de los proveedores, paradas de máquinas, falta de calidad, rupturas de stocks, demanda incierta, cuellos de botella en recursos clave, etc., evitando de esta forma que podamos luchar contra ellos y buscar así su solución definitiva (ver Figuras 6.2*a*, *b* y *c*).

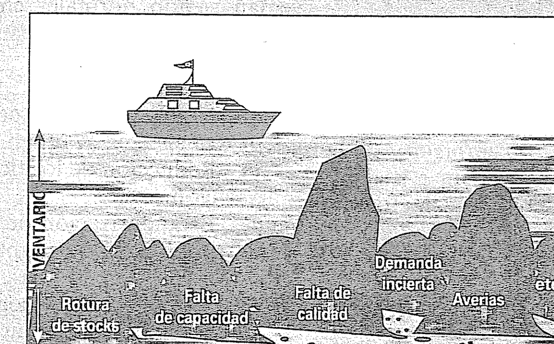


Figura 6.2*a*. El nivel del agua (inventario) hace que el barco (empresa) navegue plácidamente.

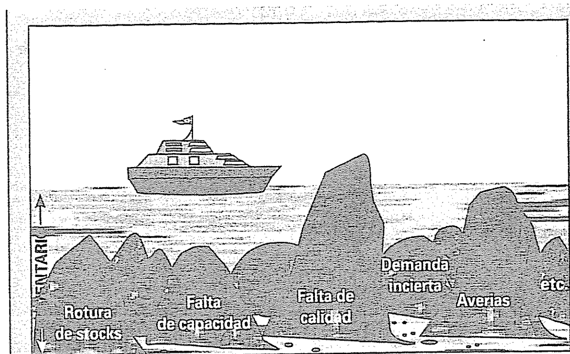


Figura 6.2b. Al bajar el nivel del inventario se dejan a la luz los problemas.

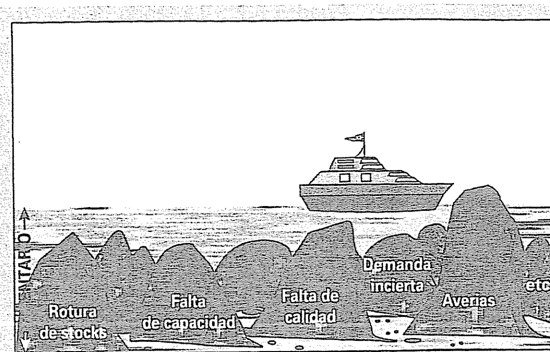


Figura 6.2c. Solucionado el problema, el barco puede seguir navegando.

◦ **Cero plazos**

En un entorno competitivo como el nuestro, las empresas que comercialicen primero gozarán de la oportunidad de establecer el liderazgo de su marca. Además, para poder reducir los niveles de stocks y conseguir flexibilidad para adaptarse a los cambios de la demanda, es preciso reducir los ciclos de fabricación de los productos. Por tanto, es crítico eliminar al máximo todos los tiempos no directamente indispensables, en particular los tiempos de espera, de preparaciones y de tránsito (ver Capítulo 2).

◦ **Cero papel (o cero burocracia)**

El JIT, en su lucha continua por la sencillez y eliminación de costes superfluos, entabla una batalla permanente contra la «fábrica oculta». En este sentido, intenta eliminar, en la medida de lo posible, cualquier burocracia de la empresa. Además apuesta por captar y distribuir la información a través de ordenadores que agilicen la captación, actualización, transmisión y acceso desde las distintas divisiones funcionales a la información almacenada en las bases de datos corporativas, lo cual simplifica considerablemente las tareas administrativas.

Para la consecución de sus metas, algunas de ellas verdaderamente ambiciosas, el JIT establece y trabaja con una serie de elementos. Algunos de ellos implican importantes diferencias con los conceptos o modos de actuación que venían siendo normales en la gestión clásica del Subsistema de Operaciones. Nosotros analizaremos los siguientes:

a) Nivelado de la producción.
b) El sistema Kanban.
c) Reducción de los tiempos de preparación (el sistema SMED) y de fabricación.
d) Estandarización de las operaciones.
e) Capacidad de adaptación a la demanda mediante flexibilidad en el número de trabajadores: *Shojinka*.
f) Programas de recogida y aprovechamiento de las ideas y sugerencias de los trabajadores para mejorar las operaciones e incrementar la productividad: *Soikufu*
g) Control autónomo de los defectos o *Jidoka*.
h) El mantenimiento productivo total.
i) Las relaciones con los proveedores y los clientes.

6.3. EL NIVELADO DE LA PRODUCCION

Ciertos procesos productivos trabajan con cantidades o intervalos de tiempo irregulares, ya sea debido a las inestabilidades de la demanda o a cualquier otra causa. En este caso, los procesos precedentes, que le suministran material, necesitarán mantener inventarios de seguridad, o personal y capacidad extra, que compensen dichas irregularidades. Es lógico, por tanto, que cualquier sistema que, como el JIT, intenta eliminar todo tipo de despilfarro en los procesos de fabricación (trabajando con los mínimos de inventarios y personal), requiera de una gran estabilidad en los flujos de producción; así, los distintos componentes y materiales circularán de forma continua y estable a lo largo de todo el proceso. Dado que el escenario normal de la empresa no suele cumplir los requisitos de estabilidad exigidos, el JIT intenta conseguirla elaborando planes y programas de producción que minimicen las mencionadas variaciones.

En resumen, bajo la filosofía «Justo a tiempo», la empresa se prepara para ejecutar programas nivelados. Ello implicaría conseguir que la producción y, consiguientemente, los recursos que ésta emplea, se distribuyesen de la forma más uniforme posible a lo largo del tiempo. En el caso de una línea de montaje dedicada a obtener un cierto mix de productos finales (opciones) a partir de un cierto módulo representativo de una familia[3], la nivelación debe extenderse tanto a la producción media diaria del módulo en cuestión como a la cantidad media de cada producto final en la cantidad total del mix mencionado. Así pues, dicho programa no debe dar lugar a grandes series de un único producto, sino a muchas variedades diarias en pequeños lotes, con lo que conseguiremos, además, una rápida adaptación a las posibles variaciones de la demanda. La regularidad en la producción, que se consigue con la ejecución de estos programas nivelados, se convierte en una de las características fundamentales que ayudan a distinguir a la producción «Justo a tiempo» del resto de los sistemas alternativos.

El proceso de planificación de la producción en el JIT sigue un enfoque jerárquico y suele coincidir en sus primeras etapas con las de cualquier sistema de planificación convencional (ver Capítulo 1), encontrándose las primeras diferencias significativas a partir de la elaboración del Programa Maestro de Producción. A continuación comentaremos dichas peculiaridades

6.3.1. Programa Maestro de Producción (PMP)

Suele tener un horizonte temporal de tres a seis meses. Su revisión suele ser mensual, ya que este programa debe contar con mayor nivel de detalle cuanto más cercano esté el mes planificado del momento actual. Así, mientras que en los meses más lejanos la producción está agregada por familias, a medida que nos acercamos al momento actual, los períodos de tiempo o/y las cantidades se desagregan, de forma que los períodos más cercanos están subdivididos en días y se contemplan las cantidades a elaborar de cada producto final del mix representado por la familia. Por ejemplo, si suponemos que nos encontramos a 1 de enero, el programa podría recoger los meses de enero, febrero, marzo y abril. Para estos dos últimos meses se recogería sólo un plan inicial para el montaje final basado en previsiones. Suele ir detallado por familias de productos, con un resumen de las

[3] Ver Capítulo 4 (Apartados 4.4.1 y 4.4.2) y Monden (1987, pág. 65).

cantidades a montar. El mes de febrero también estará estructurado por familias, pero ya con mayor nivel de desagregación temporal, al estar dividido en cubos de tiempo más pequeños (de una o dos semanas). Por otra parte, la previsión habrá ganado en realismo debido a su mayor proximidad temporal. Para el mes de enero, deben estar «congelados» varios de sus cubos de tiempos (al menos debe estarlo el primero de ellos). Dichos períodos tienen la misma duración que en el mes anterior. Para la parte congelada debe aparecer un resumen diario completamente detallado de cada producto a fabricar.

Uno de los aspectos más importantes que se derivan del Programa Maestro de Producción es la tasa media diaria de fabricación para el proceso productivo (producción del período/días laborables del período), ya que, como veremos más adelante, la mayoría de los problemas pueden venir provocados por sus posibles variaciones. Ya hemos citado que, al igual que sucedía en el MRP, la primera parte del Programa Maestro de Producción debe ser firme. En cuanto a la longitud ideal de dicha porción, dependerá de la posibilidad de planificar y preparar físicamente el sistema para posibles variaciones en la tasa media de producción o en el mix de productos. En cualquier caso, debe adoptarse una solución de compromiso ya que, por una parte, un período firme muy largo puede restar capacidad de respuesta ante los cambios de los clientes y, por otra, un período muy corto puede no favorecer la regularidad buscada en la fabricación.

6.3.2. Plan de Materiales

A partir del Programa Maestro de Producción, y con la ayuda de la lista de materiales, se realiza una explosión de necesidades similar a la estudiada en MRP, pero mucho más sencilla debido a la estabilidad del PMP. Sin embargo, aquí no se utiliza como meta esencial para la producción, sino que su misión es la de advertir a los distintos responsables de los centros de trabajo, finales o intermedios, así como a los supervisores de aprovisionamiento, sobre las necesidades que van a sufrir en un próximo futuro. Los responsables de cada puesto utilizarán estos programas para prepararse en cuanto a mano de obra, materiales, componentes, mantenimiento productivo, etc., se refiere, anticipando así la organización necesaria para dar cumplimiento al nuevo ciclo de fabricación requerido (ver Ejemplo 6.1 y Apartado 7.2). Si, una vez evaluado, el plan no resulta viable en cualquier parte de la empresa, los planificadores deberán replantearlo.

6.3.3. Programa de Montaje Final

Los Programas Diarios para el Montaje Final se elaboran a partir de la parte firme del Programa Maestro de Producción. Para que éste dé lugar a una carga nivelada, las cantidades a fabricar durante dicho intervalo se reparten de manera uniforme a lo largo de todos los días laborables del citado período firme. La programación sólo se entrega al puesto de montaje final (ver Apartado 6.4), ya que éste, a través de la utilización del sistema Kanban, que analizaremos a continuación, pondrá en marcha todo el proceso de fabricación, asegurándose una perfecta coordinación entre todos los puestos de trabajo y facilitando la fabricación sin stocks. En el Ejemplo 6.1 se ilustra lo expuesto anteriormente.

EJEMPLO 6.1. Cálculo de un Programa de Montaje Final nivelado

Supongamos que para una determinada línea de montaje las necesidades impuestas por el período firme del Programa Maestro de Producción «un mes con 20 días laborables» suponen una cifra de 10.000 unidades de cierta familia que, desglosadas por productos, queda como sigue: producto A = 4.000 unidades, producto B = 3.000 unidades, producto C = 2.000 unidades, producto D = 1.000 unidades. Sabemos que en la línea se trabaja en un doble turno (de ocho horas cada uno). De dicho tiempo habrá que descontar 20 minutos diarios, empleados en el cambio de turno. En cuanto a los factores productivos necesarios, sólo se utilizan dos tipos de recursos (1 y 2), cuyo consumo por unidad de producto es el reflejado en la Tabla 6.1. Con todos estos datos habrá que determinarse un programa de montaje final nivelado.

Tabla 6.1. Consumo unitario de recursos

Producto	Consumo unitario del recurso 1	Consumo unitario del recurso 2
A	3	2
B	6	1
C	4	4
D	2	1

6.1.A. **Determinación de la tasa media diaria de fabricación y del ciclo de fabricación**

Dadas las necesidades de fabricación y los días disponibles, conseguir un programa nivelado implicaría una **tasa media diaria de fabricación de productos finales en la línea, MDF**, igual a 10.000 unidades/20 días laborables = **500 unidades/día**. Además, los productos deberán realizarse en las proporciones indicadas en la Tabla 6.2.

Tabla 6.2. Desglose por productos de la fabricación

Tipos	Demanda mensual		Fabricación diaria
A	4.000 un.	:20	200 un.
B	3.000 un.		150 un.
C	2.000 un.		100 un.
D	1.000 un.		50 un.
Total	10.000 un.		500 un./día.

Antes de seguir adelante, definiremos el **ciclo de fabricación del sistema** como el período de tiempo que transcurre entre la salida de dos productos finales. De acuerdo con ello, el ciclo de fabricación medio se calcularía de la siguiente forma:

Minutos disponibles diariamente para labores de fabricación: (2 turnos/día × 8 horas/turno × 60 minutos/hora) − 20 minutos entre turnos = 940 minutos/día. Dado que hay que fabricar 500 unidades diarias, quiere decir que cada 940/500 = 1,88 minutos (como media) debe estar terminado un producto. Además, para hacer frente a la demanda diaria, cumpliendo, a su vez, los objetivos propuestos para los programas nivelados, el ciclo de fabricación de los productos A debería ser de 940/200 = 4,7 minutos, el de los productos B de 940/150 = 6,27 minutos, el de los productos C de 940/100 = 9,4 minutos y, por último, el de los productos D de 940/50 = 18,8 minutos. Por tanto, cada 18 minutos con 48 segundos, el ciclo de fabricación más largo de los calculados, deberían obtenerse 4 unidades del producto A (ciclo de D/ciclo de A = 18,8/4,7), 3 unidades del producto B (18,8/6,27), 2 unidades del producto C (18,8/9,4) y una sola del tipo D. Es decir, un posible Programa de Montaje Final nivelado podría ser el que implicase la fabricación de la siguiente secuencia de productos finales: AAAABBBCCD, la cual debería repetirse hasta terminar los productos programados.

Sin embargo, la secuencia deducida en el ejemplo anterior puede no implicar un consumo nivelado de recursos si, como efectivamente sucede, la elaboración de cada producto final requiere distintas cantidades de aquéllos. Un programa nivelado debe tener esto en cuenta y proponer una secuencia de operaciones que proporcione una distribución temporal del consumo de estos recursos lo más homogénea posible. Para conseguir esta nivelación, la empresa Toyota utiliza un proceso iterativo al cual denomina *Método de persecución de objetivos*, que pasamos a exponer a continuación, utilizando para ello la siguiente nomenclatura:

i = distintos productos finales a fabricar, $i = \{1,2,3,...,M\}$.
n_i = cantidad de unidades a fabricar de cada producto final.

N = número total de productos finales a fabricar, $N = \sum_{i=1}^{M} n_i$.

j = distintos recursos productivos a emplear en la fabricación, $j = \{1, 2, ..., m\}$.

$r\,(i, j)$ = cantidad necesaria del recurso j para fabricar una unidad del producto i.

Rj = cantidad total necesaria de recurso j, $Rj = \sum_{i=1}^{M} n_i \times r\,(i, j)$.

r_j = cantidad media de recurso j utilizada por cada unidad de producto final fabricado $r_j = Rj/N$.

Si el consumo de recursos por parte de todos los productos finales respondiese al valor medio, rj, después del montaje de K productos finales, el consumo acumulado sería $K \times rj$, es decir, estaría situado sobre la recta trazada en la Figura 6.3. Ahora bien, dado que esto no tiene por qué cumplirse, existirán desviaciones respecto a dicho valor, pudiendo obtenerse un valor real, $C_{j,k}$, distinto (ver Figura 6.3). En resumidas cuentas, después de haber montado K productos finales habrá una diferencia entre el consumo real realizado del recurso j y el consumo medio estimado, diferencia que será igual a $C_{j,k} - K \times r_j$; pues bien, será esta diferencia la que habrá que procurar minimizar si se desea que el consumo del recurso esté lo más equilibrado posible en el tiempo. Para tener en cuenta el hecho de que tanto las diferencias positivas como negativas son perjudiciales, en Toyota se emplea la diferencia cuadrática, eligiendo, a la hora de incorporar un nuevo producto a la secuencia final de montaje, aquel que minimice la siguiente expresión:

$$Dk = \sum_{j=1}^{m} (C_{j,k} - Kr_j)^2$$

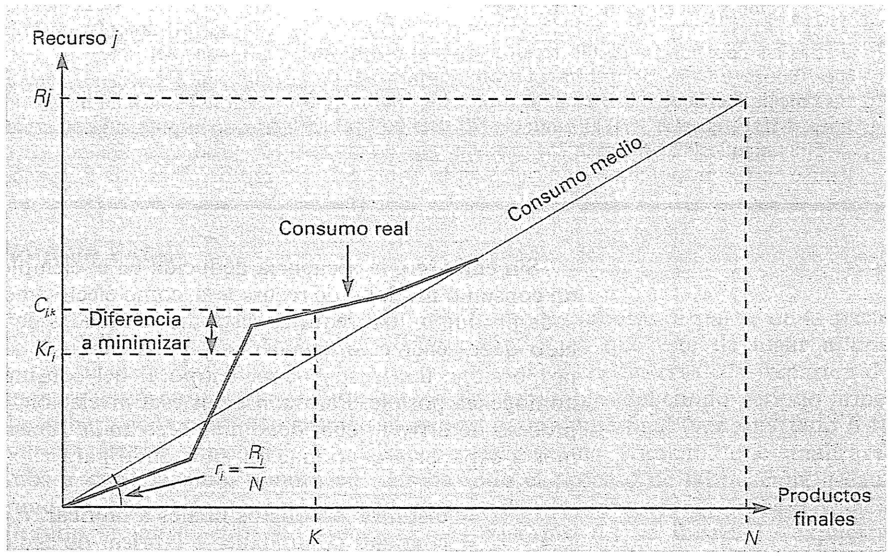


Figura 6.3. Diferencias entre el consumo medio y real del recurso j.

EJEMPLO 6.1. Cálculo de un Programa de Montaje Final nivelado (*continuación*)

6.1.B. Determinación de una secuencia alternativa

Volviendo al ejemplo anterior, utilizaremos *el método de persecución de objetivos* para determinar una secuencia alternativa a la ya propuesta (AAAABBBCCD) de forma que se nivele la utilización que se realice de los recursos 1 y 2. Los datos de partida para buscar esta secuencia óptima de fabricación son los recogidos en el enunciado; con ellos elaboramos la Tabla 6.3, donde se recoge la cantidad total de cada uno de los recursos a emplear (Rj) para los 10 productos de la secuencia y la media r_j en caso de que su consumo fuese regular.

Tabla 6.3. Cálculo de Rj y rj

Producto	n_i	$r(i, 1)$	$n_i \times r(i, 1)$	$r(i, 2)$	$n_i \times (ri, 2)$
A	(4)	(3)	(12)	2	8
B	3	6	18	1	3
C	(2)	4	8	(4)	(8)
D	1	2	2	1	1
Total	n = (10)		R_1 = (40)		$R_2 = 20$
$rj = \frac{Rj}{N}$		$r_1 = \frac{40}{10} = 4$		$r_2 = \frac{20}{10} = 2$	

Antes de comenzar a buscar la secuencia óptima, tenemos que aclarar que, al tratarse de un procedimiento iterativo según k, el consumo real acumulado de un determinado recurso, j, cuando llevamos k productos finales fabricados, $C_{j,k}$, habrá de calcularse en función del consumo anterior, es decir, habrá que sumar a $C_{j,k-1}$ la cantidad de recurso j consumido por el último tipo de producto final incorporado a la secuencia de fabricación. En todo caso, $C_{j,0}$ (consumo del recurso j cuando $k = 0$, es decir, no hemos empezado a fabricar) es igual a cero. Estamos ya en condiciones de comenzar el proceso iterativo que conducirá a la creación de una secuencia de montaje final nivelada. Para $k = 1$ existen las siguientes posibilidades:

$$k = 1 \Rightarrow C_{1,0} = 0 \;,\; C_{2,0} = 0 \;,$$
$$K \times r_1 = 1 \times 4 = 4 \;,\; K \times r_2 = 1 \times 2 = 2$$

∘ *Posibilidades de comienzo de la secuencia:*

$$\text{Producto } A \begin{cases} C_{1,1} = C_{1,0} + r\,(A, 1) = 0 + 3 = 3 \\ C_{2,1} = C_{2,0} + r\,(A, 2) = 0 + 2 = 2 \end{cases}$$

como puede observarse, mientras el consumo del recurso 2 se situaría en la media, el del recurso 1 no llegaría a ella. La distancia Dk en este caso será

$$\boxed{D1_A} = \sum_{j=1}^{m} (C_{j,k} - Kr_j)^2 = (3-4)^2 + (2-2)^2 = \boxed{1}$$

$$\text{Producto } B \begin{cases} C_{1,1} = C_{1,0} + r(B, 1) = 0 + 6 = 6 \\ C_{2,1} = C_{2,0} + r(B, 2) = 0 + 1 = 1 \end{cases} \Rightarrow$$
$$\Rightarrow D1_B = (6-4)^2 + (1-2)^2 = 5$$

$$\text{Producto } C \begin{cases} C_{1,1} = C_{1,0} + r\,(C, 1) = 0 + 4 = 4 \\ C_{2,1} = C_{2,0} + r\,(C, 2) = 0 + 4 = 4 \end{cases} \Rightarrow$$
$$\Rightarrow D1_C = (4-4)^2 + (4-2)^2 = 4$$

$$\text{Producto } D \begin{cases} C_{1,1} = C_{1,0} + r\,(D, 1) = 0 + 2 = 2 \\ C_{2,1} = C_{2,0} + r\,(D, 2) = 0 + 1 = 1 \end{cases} \Rightarrow$$
$$\Rightarrow D1_D = (2-4)^2 + (1-2)^2 = 5$$

Dado que debemos elegir aquel producto que minimice la distancia entre el consumo real y el consumo medio, **debemos comenzar fabricando un producto *A***, con lo cual, los datos para la siguiente iteración serán los siguientes:

$$K = 2 \Rightarrow C_{1,1} = 3 \;;\; C_{2,1} = 2 \;,$$
$$K \times r_1 = 2 \times 4 = 8 \;;\; K \times r_2 = 2 \times 2 = 4$$

∘ *Posibilidades de continuación de la secuencia de fabricación:*

$$\text{Producto } A \begin{cases} C_{1,2} = C_{1,1} + r\,(A, 1) = 3 + 3 = 6 \\ C_{2,2} = C_{2,1} + r\,(A, 2) = 2 + 2 = 4 \end{cases} \Rightarrow$$
$$\Rightarrow D2_A = (6-8)^2 + (4-4)^2 = 4$$

$$\text{Producto } B \begin{cases} C_{1,2} = C_{1,1} + r\,(B, 1) = 3 + 6 = 9 \\ C_{2,2} = C_{2,1} + r\,(B, 2) = 2 + 1 = 3 \end{cases} \Rightarrow$$
$$\Rightarrow \boxed{D2_B} = (9-8)^2 + (3-4)^2 = \boxed{2}$$

$$\text{Producto } C \begin{cases} C_{1,2} = C_{1,1} + r\,(C, 1) = 3 + 4 = 7 \\ C_{2,2} = C_{2,1} + r\,(C, 2) = 2 + 4 = 6 \end{cases} \Rightarrow$$
$$\Rightarrow D2_C = (7-8)^2 + (6-4)^2 = 5$$

$$\text{Producto } D \begin{cases} C_{1,2} = C_{1,1} + r(D, 1) = 3 + 2 = 5 \\ C_{2,2} = C_{2,1} + r(D, 2) = 2 + 1 = 3 \end{cases} \Rightarrow$$
$$\Rightarrow D2_D = (5-8)^2 + (3-4)^2 = 10$$

En este caso, el producto que minimiza la distancia acumulada es el **producto *B***, por lo que debe ser éste el que siga en la secuencia de fabricación. Si seguimos este proceso llegaríamos a encontrar una secuencia de productos finales que, repetida hasta agotar los requeridos diariamente, nivelaría lo más posible el consumo de los dos recursos productivos 1 y 2.

El hecho de que la programación de la producción se lleve a los niveles de precisión y equilibrado vistos en el ejercicio anterior, no impide que surjan problemas que puedan retrasar su ejecución. Sin embargo, rara vez tales problemas suponen una merma en la eficacia del sistema, ya que la mayoría de ellos pueden solventarse con pequeños cambios en la secuencia de montaje o en la proporción de productos a realizar en un determinado período. En realidad, el objetivo se considera cumplido si se termina el número de unidades programadas, con su correspondiente mix de productos, con la mayor fidelidad posible respecto al programa previsto. Lo que suele ser más problemático son los cambios en la tasa media diaria de fabricación de un período firme a otro, originados por variaciones de la demanda externa. Para hacer frente a esta eventualidad, las empresas japonesas hacen uso de la gran flexibilidad de sus plantas de producción y renuncian a la solución fácil de acumular inventarios de seguridad. Como ejemplo de ello, en el Cuadro 6.3 (Shingo, 1990) vamos a analizar las distintas medidas que es posible tomar en la empresa Toyota en repuesta a posibles variaciones de la demanda.

Cuadro 6.3. Medidas de la empresa Toyota ante variaciones en la demanda (Shingo, 1990)

◦ Respuesta a incrementos de demanda

Es normal que en Toyota las máquinas no sean utilizadas al 100 por 100 de su capacidad, sino que, en condiciones normales, se les asigne una carga que puede oscilar entre el 50 y el 90 por 100 de su capacidad total. Por otra parte, al ser los trabajadores polivalentes (ver Capítulo 7, Apartado 7.3) pueden ocuparse de varias máquinas a la vez (normalmente 10). Estas condiciones posibilitan que ante estos incrementos de demanda, se pueda contratar a trabajadores temporales, reduciendo el número de máquinas que maneja cada uno y elevando el grado de utilización de la maquinaria hasta llegar al 100 por 100. Para ello se dispone de máquinas de fácil manejo donde el trabajador temporal adquiere rápidamente la destreza necesaria. Con este tipo de medidas, que, en definitiva, permiten reducir el ciclo de fabricación, es posible aumentar ostensiblemente el volumen de producción.

Por otra parte, Toyota puede adaptarse rápidamente a cualquier incremento de demanda a corto plazo utilizando horas extraordinarias. Ello es posible porque se trabaja en doble turno: el primero de ellos en horario de 8 de la mañana a 5 de la tarde, y el segundo de 9 de la noche a 6 de la mañana. De esta forma, utilizando las horas entre turnos para la realización de horas extraordinarias, Toyota puede conseguir incrementos de producción de hasta el 37,5 por 100.

◦ Respuesta a decrementos de la demanda

Estos problemas son ciertamente de más difícil solución, ya que normalmente suponen dejar a parte de las máquinas y de los obreros fuera de las labores de producción. Este hecho, que no es aceptado normalmente en las empresas occidentales, es bien asumido en Japón, donde se prefiere dejar a los obreros parados antes que incurrir en una sobreproducción que de lugar a acumulaciones innecesarias de inventarios. La solución utilizada en Toyota suele consistir en reducir el número de obreros asignados a la línea que ha sufrido el decremento de demanda (cada uno de los restantes tendrá que manejar mayor número de máquinas) aumentado así el ciclo de fabricación. Esta solución no tiene que suponer el despido de trabajadores, ya que los que provisionalmente han sido retirados de la producción pueden ser transferidos a otras líneas de montaje o dedicados a otras labores igualmente beneficiosas para la empresa, tales como:

- Realizar aquellas actividades de reparación y mantenimiento que no pudieran llevarse a cabo durante el ciclo regular de producción.
- Reuniones de círculos de calidad (ver Capítulo 7, Apartado 7.4, y Capítulo 11).
- Reparación de escapes y fugas en la fábrica.
- Practicar cambios de útiles y herramientas.
- Fabricar plantillas y accesorios para las mejoras planificadas.
- Fabricación de piezas que venían siendo adquiridas a los proveedores.
- Etcétera.

Dado el tipo de problemas que pueden plantearse por las disminuciones de demanda, el objetivo en Toyota es investigar continuamente en mejoras que permitan atender a los requerimientos del mercado con el menor número de trabajadores posible. Esta actitud ha llevado a un coste de personal que oscila entre un 20 y un 30 por 100 más bajo que el de sus competidores. Sin embargo, esta estrategia de disminución no se aplica al volumen de máquinas disponibles, ya que consideran que es conveniente retener el exceso de capacidad para responder a posibles incrementos en la demanda.

Antes de concluir este apartado, nos gustaría resaltar que para conseguir el nivelado de la producción y hacer posible y rentable la fabricación en pequeños lotes de productos distintos, es fundamental la reducción de los plazos de fabricación, lo que a su vez requiere reducir los tiempos de las preparaciones, llegando a crear situaciones donde el cambio entre modelos tenga un coste nulo o insignificante.

Una vez analizados los procesos de planificación y programación de la producción, dedicaremos el siguiente apartado al estudio del sistema que hace posible la *ejecución y el control* de la misma dentro de una planta que trabaje con JIT: **el sistema Kanban**

6.4. EJECUCION Y CONTROL: EL SISTEMA KANBAN

Como vimos en el Capítulo 4, cuando se trabaja con MRP, el Plan de Materiales es comunicado a todos los centros de trabajo, actuando éste como orden y autorización de fabricación. A partir de ese momento, cualquier centro de trabajo comienza sus labores de producción, suministrando la fabricación obtenida al siguiente puesto en el proceso productivo, que debe recibirla en el momento adecuado, si no aparecen problemas inesperados. La norma de fabricar los componentes y enviarlos a donde se necesitan, empujando así el material a lo largo de la línea de producción de acuerdo con el plan de materiales, caracteriza al MRP como un *sistema de empuje (push)*, basado en la premisa de que es mejor anticipar las necesidades antes de que éstas se produzcan (ver Figura 6.4*a*). En estos sistemas, cualquier desviación con respecto a la programación da lugar a problemas, algunos de los cuales se pueden transformar en acumulaciones innecesarias de productos en curso. Además, por actuar de forma centralizada, y por trabajar con tamaños de lotes y tiempos de suministros supuestamente constantes y predeterminados, cualquier cambio en la programación inicial puede dar lugar a una serie de dificultades. Para hacer frente a ellas, se emplea la reprogramación y, en su caso, el mantenimiento de cierto nivel de inventarios de seguridad. Debido a lo anterior, en estos sistemas de «empuje», la labor de control de la producción se concreta en intentar mantenerla dentro del programa, tomando las medidas oportunas en caso de observarse cualquier tipo de desviación.

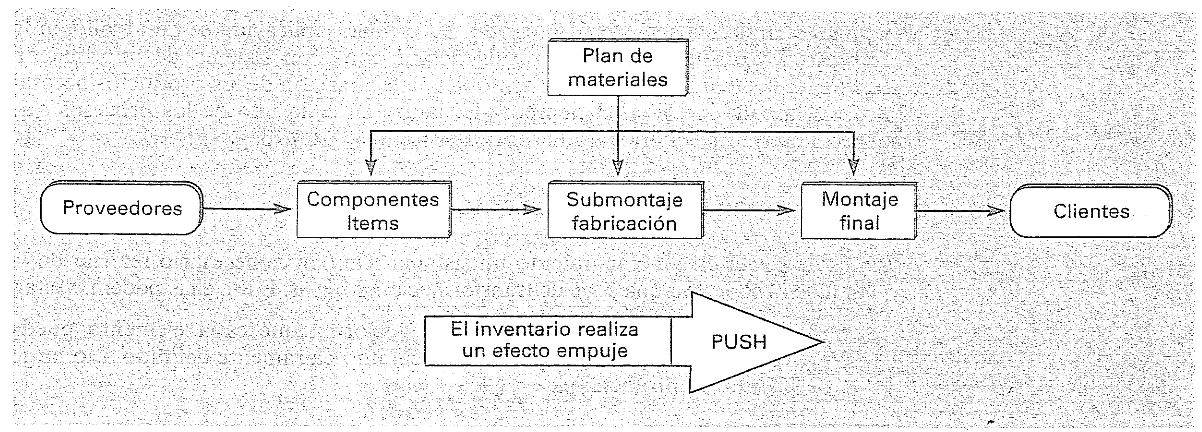


Figura 6.4*a*. Sistema «*push*».

Ante estas dificultades de los sistemas de «empuje» existe una alternativa, la de los *sistemas de «arrastre» o «tirón»* (pull), *utilizada por el JIT*, donde ya no es el proceso anterior el que decide suministrar los componentes al proceso siguiente, le hagan falta o no en ese momento, sino que será el proceso siguiente el que le retire al anterior las piezas necesarias, en la cantidad justa y en el preciso momento en que las necesite (Figura 6.4*b*). Además, para el perfecto control de la producción, el proceso suministrador sólo estará autorizado a reiniciar las labores de fabricación cuando se le hayan retirado un determinado número de piezas terminadas, debiendo fabricar de nuevo justo esa cantidad. Esto hace que el programa de producción sólo sea comunicado «como orden de fabricación» al puesto de montaje final, desencadenando éste todo el proceso de producción a medida que retira los componentes necesarios para montar los productos finales.

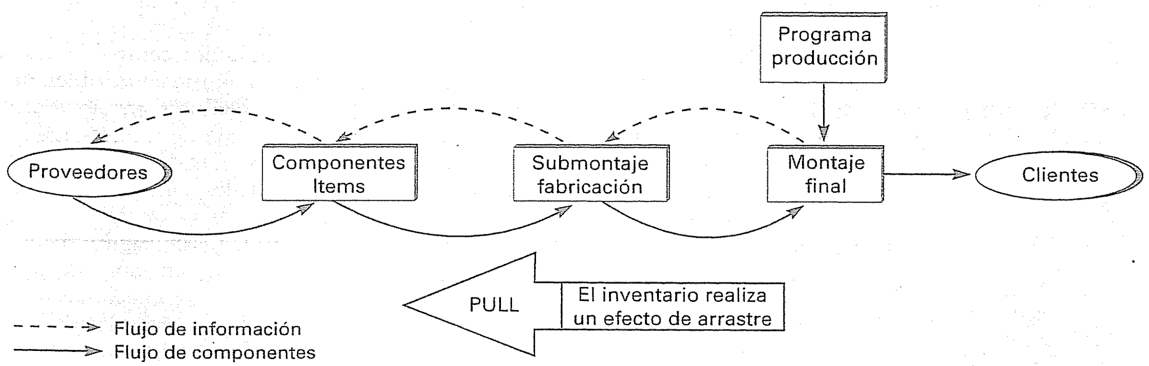


Figura 6.4*b*. Sistema «pull».

El sistema Kanban es un sistema de arrastre basado en la utilización de una serie de tarjetas, normalmente rectangulares y enfundadas en plástico, que dirigen y controlan la producción entre los distintos centros de trabajo (Kanban en japonés significa tarjeta, señal o cartel). Su primera aplicación se desarrolló en la empresa Toyota en 1975 y se puede definir como un sistema de información completo, que controla de forma armónica la fabricación de los productos necesarios, en la cantidad y en el tiempo adecuados, en cada uno de los procesos que tienen lugar en el interior de la fábrica (Monden, 1987, pág. 15)[4].

6.4.1. Principales tipos de Kanbans y funcionamiento del sistema

Antes de poner en funcionamiento un sistema Kanban es necesario realizar en la planta de producción una serie de transformaciones físicas. Entre ellas podemos citar:

- Hay que fijar el diagrama de flujos de forma que cada elemento pueda provenir de un solo lugar y tenga un camino claramente definido a lo largo de la ruta de producción.

[4] Como veremos más adelante, estas tarjetas también pueden ser utilizadas para comunicar necesidades de materiales entre una empresa cliente y sus proveedores.

- Al suprimirse los almacenes, cada centro de trabajo debe contar con una zona donde depositar los elementos que constituyen sus *inputs* y otra para almacenar sus *outputs* o items elaborados.
- Cualquier puesto de ensamblaje, ya sea intermedio o final, que utilice distintas piezas o componentes, deberá dividir su zona de *inputs* con lugares determinados para cada uno de ellos. Cualquier puesto que suministre piezas a más de un proceso posterior deberá realizar una operación similar con su zona de *outputs*.
- En cada una de estas zonas de almacenaje será necesaria la instalación de uno o más buzones que, posteriormente, servirán para la recogida de los Kanbans.

Aunque, como veremos más adelante, pueden utilizarse muchos más, existen dos tipos fundamentales de Kanbans:

- **Kanbans de transporte** o de movimiento, que se mueven entre dos puestos de trabajo e indican las cantidades de producto a retirar del proceso anterior. En la información recogida en este tipo de Kanban debe figurar toda aquella que facilite la localización y el transporte de los items necesarios entre los puestos de trabajo entre los que se mueve (Figura 6.5*a*).
- **Kanbans de producción,** que se mueven dentro del puesto de trabajo y funcionan como orden de fabricación. Estos deben contener toda aquella información necesaria para facilitar la fabricación de la pieza a la que haga referencia (Figura 6.5*b*).

Tan característicos como las propias tarjetas son los contenedores que se utilizan para almacenar y traspasar componentes de un proceso a otro; éstos

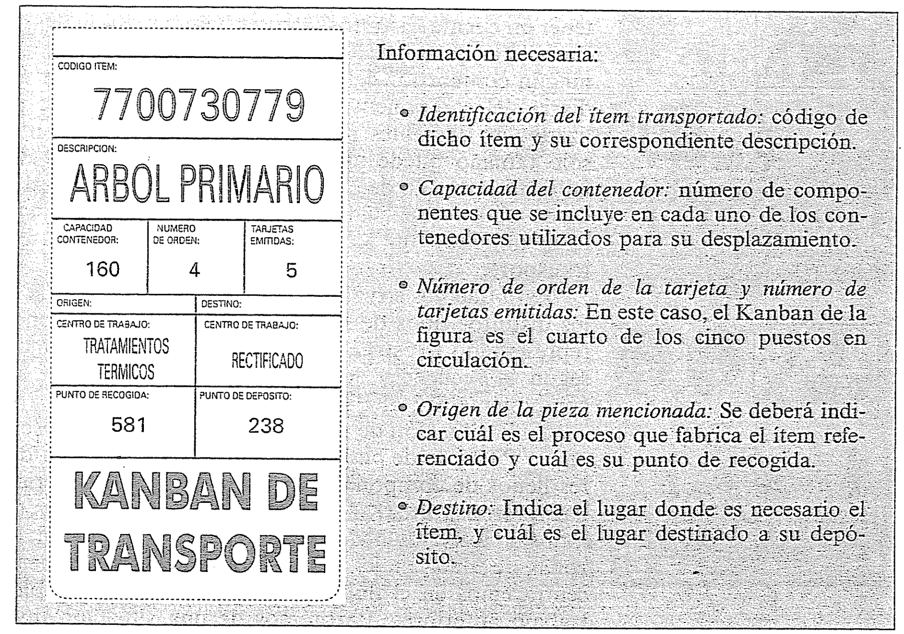


Figura 6.5*a*. Kanban de transporte o movimiento.



Información necesaria:

- *Identificación del ítem a fabricar:* Código de dicho ítem y su correspondiente descripción.
- *Identificación del centro de trabajo* donde se fabrica el ítem y el lugar de depósito donde han de situarse los items ya elaborados.
- *Capacidad del contenedor:* Número de items por contenedor.
- *Identificación de los componentes necesarios* que intervienen como entradas y sus respectivos puntos de recogida.

Figura 6.5*b*. Kanban de producción.

deben tener un tamaño estándar cuya determinación no es fácil, ya que habrá que tener en cuenta distintos factores como: manipulación del material, congestión de los talleres, proximidad de los centros de trabajo, etc. En Toyota se considera que ningún contenedor debe tener un tamaño superior al 10 por 100 de la demanda diaria del componente tratado (Volmann, 1991, pág 307). Según estudios realizados en diferentes plantas, se estima que un contenedor estandarizado de un solo tamaño puede utilizarse para el 80 por 100 de las piezas y componentes fabricados en una determinada planta (Hall, 1988, pág. 243). Es conveniente saber desde ahora que cualquier contenedor que se encuentre lleno de piezas debe tener adherido un Kanban, el cual, según los casos, será de producción o de transporte.

Para que nos sirva de apoyo en la explicación de la circulación en la planta de los distintos tipos de Kanbans, nos apoyaremos en la Figura 6.6, donde hemos representado la estructura de dos centros de trabajo, PT1 y PT2, de forma que, según la secuencia de operaciones, es el PT1 el encargado de suministrar el componente 582 al PT2.

En la situación de partida de dicha figura se observa la zona de almacenaje de *inputs* PT2 y la de *outputs* PT1. En cualquier zona de *inputs* existirán contenedores llenos de componentes, que deben llevar adheridos su correspondiente Kanban de transporte (KT); los Kanbans de producción (KP) se encontrarán incorporados a los contenedores llenos de productos elaborados depositados en sus zonas de almacenaje. Para explicar el funcionamiento del sistema Kanban, nos centraremos en el flujo de materiales que se establece entre los dos puestos de trabajo anteriores. Partiremos de una situación inicial donde en cada zona de

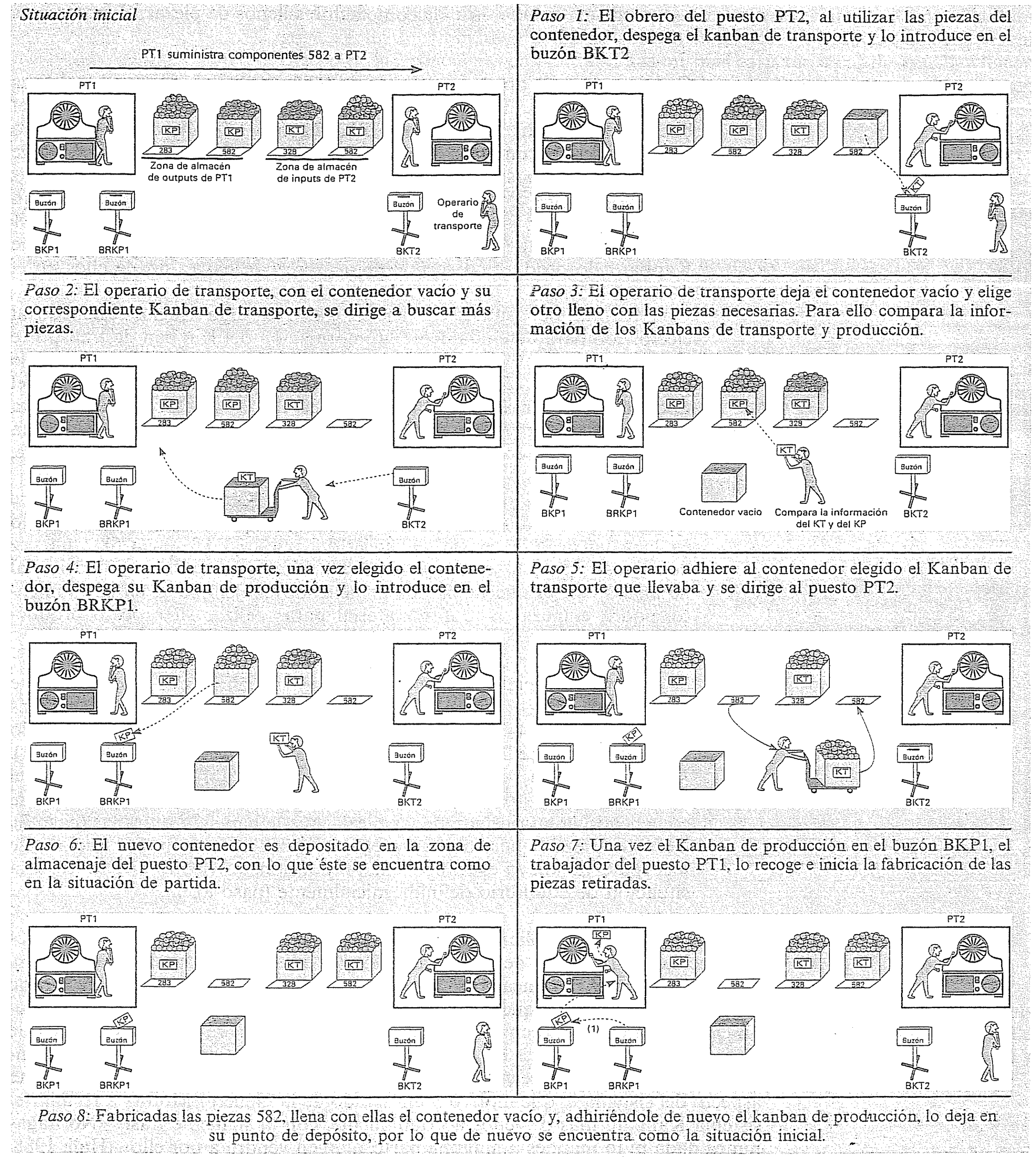


Figura 6.6. Funcionamiento del sistema Kanban.

almacenaje se encuentra una serie de contenedores llenos de piezas. El proceso es el siguiente:

a) Cada vez que el operario del puesto PT2 utiliza un contenedor de sus *inputs*, retira el Kanban de transporte que lleva pegado y lo deposita en el buzón de Kanbans de transporte BKT2 (paso 1). Cada cierto tiempo, o bien cuando se acumula un cierto número de aquéllos, un operario recoge los Kanbans depositados en el buzón y los transporta, junto con sus correspondientes contenedores vacíos, al lugar de recogida que expresan los Kanbans, en este caso la zona de almacenaje de *outputs* de PT1 (paso 2). En lo que resta de ejemplo, supondremos que la recogida de Kanbans de producción se realiza siempre que haya uno de ellos en el buzón.

b) Una vez allí, deposita el contenedor vacío en algún lugar designado al efecto, compara detenidamente la información del Kanban de transporte con los Kanbans de producción pegados a los contenedores llenos de piezas allí depositados (paso 3) y, por último, elige uno que contenga el tipo de piezas en la cantidad justa que iba a buscar. Realizada esta operación, despega el Kanban de producción del contenedor y lo deposita en el buzón de recepción de Kanbans de producción correspondiente, BRKP1 (paso 4).

c) Al contenedor al que acaba de retirarle el Kanban de producción le incorpora el de transporte que lleva en su mano y se dirige a depositarlo en la zona de almacenaje de *inputs* del puesto PT2 (paso 5). Una vez depositado (paso 6), este puesto dispone de nuevo de la cantidad inicial de *inputs* con la que habíamos comenzado el ejemplo y, en su momento, podrá empezar a retirar material para realizar su proceso productivo.

d) Entretanto, en el puesto PT1 existe un desfase con respecto a la situación de equilibrio inicial, ya que cuenta con un contenedor vacío. En este puesto, cada cierto tiempo, o bien a cada cierto número de Kanbans depositados en el buzón de recepción, éstos son traspasados, conservando el mismo orden de llegada, al buzón de Kanbans de producción (flecha 1). A partir de entonces funcionan como órdenes de fabricación, por lo que el operario del puesto PT1 recoge los Kanbans de producción del buzón, comenzado la fabricación de las piezas que le han sido retiradas (paso 7). Con las piezas que elabora, vuelve a llenar el contenedor vacío y le incorpora de nuevo el Kanban de producción, volviendo, por tanto, a la situación de equilibrio definida inicialmente (paso 8).

El procedimiento explicado puede generalizarse a todas las posibles relaciones establecidas en la planta de fabricación. Es por ello que, con el sistema Kanban, sólo es necesario comunicar el programa de montaje final al último puesto de trabajo de la cadena, ya que éste, a medida que hace uso de sus *inputs*, desencadena el proceso que pone en marcha a toda la fábrica. El resto de los puestos de trabajo sólo necesita saber los componentes que le son retirados en cada momento, ya que, hasta entonces, no puede emprender labores de fabricación. Es este aspecto del sistema el que motivó a un mando de la General Motors a resumir el sistema Kanban, más o menos acertadamente, con la siguiente frase: «No hagas nunca nada ni lo mandes a ninguna parte, alguien vendrá a por ello» (Hall, 1988, página 44).

Como se ha podido observar en la descripción anterior, el sistema Kanban goza de un funcionamiento deliberadamente simple y ofrece un control visual rápido de las existencias en planta. Estas mismas características de sencillez hacen que necesite de una gran disciplina en su aplicación para conseguir su buen funcionamiento. Dicha disciplina se concreta en la observación estricta de las reglas que aparecen en el Cuadro 6.4.

Cuadro 6.4. Reglas a observar para el buen funcionamiento del sistema Kanban (Monden, 1987)

Regla 1. El proceso posterior recogerá del anterior, del lugar adecuado, los productos necesarios en las cantidades precisas.

La aplicación de esta primera regla conlleva una serie de corolarios. Estos intentan resolver el problema de la exactitud de los datos de inventarios y el control de los mismos de forma que no se provoquen, por este motivo, problemas de incumplimiento de la programación de la producción. A este aspecto ya aludimos en el Capítulo 1 (Apartado 1.4.3.2):

- Se prohibirá cualquier retirada de piezas sin la autorización del correspondiente Kanban de transporte.
- Se prohibirá retirar más piezas que las indicadas en el Kanban.
- El Kanban siempre deberá adherirse al producto físico.

Regla 2. El proceso precedente deberá fabricar sus productos en las cantidades recogidas por el proceso siguiente.

La observación conjunta de las reglas 1 y 2 permitirá que la planta de producción funcione como una línea de transporte ideal, utilizando el Kanban como medio de conexión de todos los procesos. También esta segunda regla tiene una serie de corolarios:

- No se fabricarán más piezas que las indicadas por los Kanbans de producción.
- Cuando el proceso anterior fabrique varios tipos de piezas, su producción deberá seguir el mismo orden en que fueron depositados los respectivos Kanbans de producción en el buzón.

Regla 3. Los productos defectuosos nunca deben pasar al proceso siguiente.

La lógica de esta tercera regla es clara, ya que al tratarse de un sistema de producción que trabaja con inventarios mínimos, cualquier producto defectuoso que sea encontrado por el proceso siguiente difícilmente podrá ser sustituido a tiempo, pudiendo originar una parada de la línea de producción.

Regla 4. El número de Kanbans debe disminuirse.

Dado que cuando un contenedor está lleno de piezas debe tener adherido un Kanban, la cantidad máxima de inventario entre dos puestos de trabajo coincidirá con la siguiente formulación:

Inventario máximo = capacidad del contenedor × número de Kanbans puestos en circulación

Si se cumple lo anterior, y dado que el JIT pretende trabajar con el mínimo inventario posible, una regla de oro será la de intentar minimizar el número de Kanbans en circulación (Apartado 6.4.3). De esta forma, estaremos reduciendo los inventarios y, por tanto, caminando hacia las metas establecidas.

6.4.2. Otros tipos de Kanban

Aunque hasta el momento sólo hemos hecho referencia a los dos tipos de Kanbans fundamentales, el de producción y el de transporte[5], un sistema real puede llegar a utilizar muchos más, de los que nos gustaría resaltar: **las señales Kanban y el Kanban de proveedores**.

[5] También es posible, y así sucede a veces en la realidad, que el sistema Kanban funcione utilizando una única tarjeta.

6.4.2.1. *Las señales Kanban*

Aunque la situación ideal a la que aspira el JIT es que cada vez que se vacíe un contenedor se acometa la fabricación y sustitución de las piezas utilizadas, esto no siempre será posible. Ello es debido a que existen situaciones donde los tiempos de preparación de la maquinaria no han sido lo suficientemente mejorados, obligando a trabajar con lotes de fabricación de un tamaño superior al deseado. Una situación de este tipo se da en los procesos de estampación de Toyota, donde los tiempos de preparación de la prensa obligan a realizar un determinado número de golpes (tamaño del lote) antes de pasar al siguiente cambio de matrices. En estos casos son utilizadas las denominadas señales Kanban: el Kanban triangular y el Kanban de transporte de materiales.

El **Kanban triangular** suele ser una lámina metálica triangular como la mostrada en la Figura 6.7, cuya misión es la de indicar cuál es la cantidad de existencias precisas alcanzadas las cuales debe comenzarse la fabricación de un nuevo lote[6]. Por su parte, el **Kanban de transporte de materiales,** de forma rectangular, sirve para solicitar al proceso anterior los componentes necesarios para la fabricación de este nuevo lote. Para comprender mejor su funcionamiento imaginaremos un proceso en el que supondremos que las piezas se fabrican en lotes de 400 unidades. Una vez terminado, se apila en cuatro contenedores de 100 piezas cada uno. Pues bien, un Kanban triangular situado entre los contenedores números 2 y 3 indicará que hasta que el proceso siguiente no haya retirado los dos primeros contenedores, liberando, así, el Kanban triangular, el proceso en cuestión no estará autorizado para emprender la fabricación de un nuevo lote de piezas. El Kanban de transporte de materiales, situado en una posición anterior, será liberado antes y permitirá que, llegado el momento, estén disponibles los componentes necesarios para la fabricación del lote en cuestión.

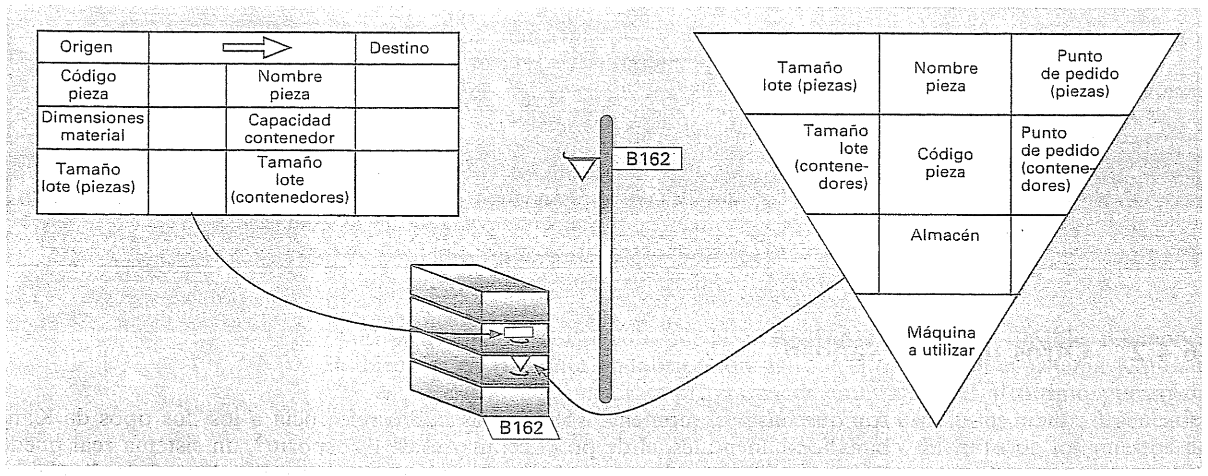


Figura 6.7. El Kanban triangular.

[6] Concepto coincidente con el Punto de Pedido de las técnicas clásicas (Capítulo 13).

6.4.2.2. *El kanban de proveedores*

Dado que una empresa que trabaje bajo la filosofía «Justo a tiempo» considerará a sus proveedores como el inicio de su proceso productivo, no es de extrañar que utilice para realizar los pedidos externos el mismo sistema Kanban que usa para controlar sus procesos internos. En todo caso, esta utilización del sistema Kanban para realizar pedidos a los proveedores, usando solamente unas simples tarjetas, ayuda a conseguir una de las metas esenciales del JIT: la eliminación de «papeleo» ineficiente. El **Kanban de proveedores** es básicamente un Kanban de transporte que incorpora la información necesaria para realizar la entrega de materiales justo en la cantidad necesaria y en el momento y lugar precisos. Un ejemplo de su uso por parte de la empresa Toyota puede ser analizado en el Capítulo 7, Apartado 7.7. El uso del EDI (ver Apartado 4.7.1.1) supone un claro avance en el empleo de este tipo de Kanbans

6.4.3. Cálculo del número de tarjetas a poner en circulación

El número de tarjetas a poner en circulación se calcula sobre la parte firme del Programa Maestro de Producción. La determinación del citado número ha constituido un popular tema de investigación y se han propuesto algunos enfoques alternativos que por razones de espacio no abordaremos aquí[7]. La fórmula más comúnmente empleada en la literatura sobre Dirección de Operaciones es la utilizada por Toyota. En ella, el número de Kanbans requeridos es función de la demanda de componentes durante un cierto tiempo de reposición (Sugimori y otros, 1977):

$$NK \geqslant (DMU * TR\ (1 + CS))/CC^{8}$$

donde:

DMU = Demanda media por unidad de tiempo durante el período firme tratado
TR = Tiempo de reposición de un contenedor (éste incluye los tiempos de transportes, de fabricación, esperas y vaciado).
CS = Coeficiente de seguridad.
CC = Capacidad del contenedor

Aunque muy extendida, dicha formulación no está exenta de problemas; el primero surge de la estimación de los tiempos de fabricación y manejo de materiales, que en Toyota son variables decisionales y en la mayor parte de las empresas dependen de numerosos factores (cargas del centro de trabajo, mix de productos, tamaño de lotes, etc.). El segundo procede de que dichos tiempos, que se encuentran en el segundo término de la fórmula anterior, son función del número de Kanbans en cada centro de trabajo, los cuales aparecen en el primer miembro de la mencionada formulación[9]. Además del resultado de estos cálculos obtendremos sólo una buena estimación del número de tarjetas que sería conveniente introducir en el sistema, ya que este número podrá variar en alguna unidad

[7] Una reciente publicación al respecto se debe a B. Berkley, 1992.
[8] Como podrá comprobarse en el Capítulo 13, esta fórmula se corresponde con el modelo básico de cantidad fija de pedido de gestión de stocks clásica.
[9] Para ampliar este tema puede verse Berkley, 1992.

dependiendo del procedimiento operativo concreto que siga la empresa (momento exacto de retirada del Kanban de transporte, sincronización con el resto de los procesos de la empresa, etc.). Todo ello convierte en necesario, una vez calculado el número de Kanbans, realizar algún tipo de simulación determinística que permita observar la sincronización entre los dos puestos de trabajo implicados en el cálculo[10]. En Toyota, la autoridad final para modificar el número de Kanbans corresponde al supervisor de cada proceso, de forma que éste tendrá que promover la mejora de sus operaciones como medio para lograr disminuir el número de Kanbans en circulación (decremento del tiempo de fabricación, de los tiempos de espera, de la necesidad del coeficiente de seguridad, etc.) que haría disminuir los factores que aparecen en el numerador.

De entre las ventajas que aporta la utilización del sistema Kanban podemos destacar las siguientes:

- Las órdenes de fabricación son siempre las mismas tarjetas, no precisándose papeles ni anotaciones para ordenar el trabajo, simplificándose así las tareas administrativas. Lo mismo podría decirse de los pedidos a los proveedores.
- Cada operario sólo puede fabricar las piezas retiradas por el proceso posterior, por lo que la fabricación de cada momento coincidirá con las necesidades reales de ese momento, evitándose así la acumulación de inventarios innecesarios.
- Al reducir los inventarios de productos intermedios facilita extremadamente la localización de cualquier problema que pueda surgir en el proceso productivo (cuellos de botella, averías, problemas de calidad, etc.), contribuyendo de esta forma a su resolución definitiva. Este aspecto del sistema Kanban lo convierte en un extraordinario método para estimular la mejora de métodos y la eliminación de cualquier ineficiencia del proceso productivo. La Figura 6.8 muestra las relaciones entre el sistema Kanban y la mejora del trabajo.

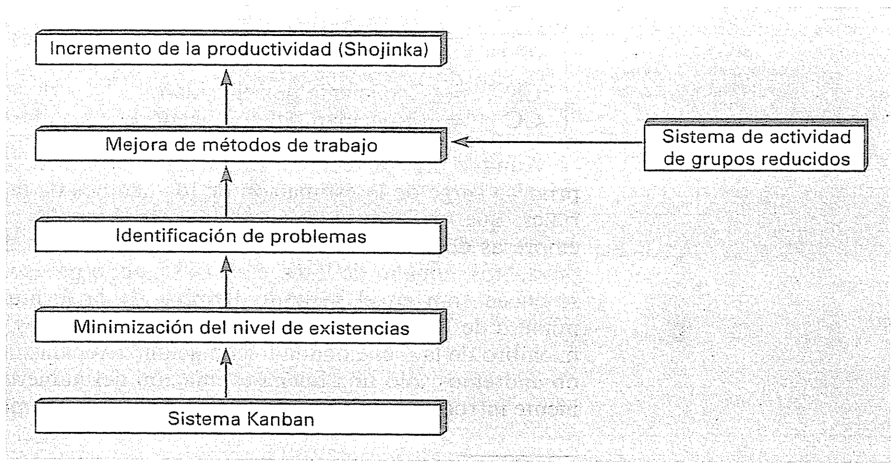


Figura 6.8. El sistema Kanban contribuye a la mejora del trabajo (Monden, 1987).

[10] Ver Hall, 1988, pág. 249.

- El sistema Kanban constituye un magnífico sistema de control visual que ayuda a la localización de anormalidades de la producción. Si, por ejemplo, se descubren en alguna zona de almacenamiento de productos elaborados, contenedores sin su correspondiente Kanban, será señal inequívoca de una sobreproducción que habrá de investigarse inmediatamente.
- El nivel de inventarios se puede regular fácilmente a través del número de tarjetas puesto en circulación.

No queremos terminar este apartado sin antes realizar dos observaciones:

- En primer lugar, que la adopción por parte de la empresa del sistema Kanban no obliga necesariamente a aplicarlo a todos sus procesos. En Toyota no se aplica el sistema a determinados procesos, como por ejemplo el montaje de motores, ya que la gran variedad existente de éstos obligaría, de utilizar el sistema Kanban, a mantener un número de existencias excesivo, ya que sería necesario, como mínimo, un motor de cada variante tanto en el proceso de montaje final como en el área de almacenaje de *output* del montaje de motores. En vez de esto, el programa de montaje final se transmite al área de montaje de motores para que éste realice su propia programación (Vollmann, 1991, pág. 308).
- En segundo lugar hay que destacar que la implantación del sistema Kanban en cualquier empresa que desee fabricar «Justo a tiempo» no debe realizarse sin antes haber conseguido minimizar las fluctuaciones de la producción a través de la ejecución de programas nivelados, un gran nivel de calidad, importantes reducciones del tiempo de preparación de las máquinas, etc. (ver Capítulo 7, Apartado 7.9).

6.5. CONSIDERACIONES FINALES

En el presente tema, además de introducir la filosofía «Justo a tiempo», hemos analizado cómo, a través del proceso de nivelación, es posible elaborar programas muy estables en su distribución temporal que ayudan a conseguir la regularidad de la producción tan característica del JIT. A nivel de ejecución y control hemos desarrollado los principios básicos del sistema Kanban, haciendo especial hincapié en su funcionamiento. Sin embargo, los métodos de planificación y control analizados sólo serán un eslabón para conseguir fabricar justo lo necesario en el momento necesario, ya que su implantación resultaría imposible si el Subsistema de Operaciones no estuviese diseñado para permitir la fabricación «Justo a tiempo». Al estudio de su necesaria adecuación dedicaremos el próximo capítulo.

REFERENCIAS Y BIBLIOGRAFIA [11]

AMES R. G.: «Zero inventories: a return to productivity», Zero Inventories, Seminar Proceedings APICS, septiembre 1983.

ARCHIER, G., y SEYEX, H.: «L'enterprise su troisieme type», 1984. Citado en *La teoría de los cinco ceros*. Cimworld, núm. 6, abril-mayo 1988.

BARCELÓ, C.: «Mitos y mentiras del milagro japonés y de los otros milagros», *Alta Dirección*, núm. 121, 1981.

BARD, J. F., y B. GOLANY: «Determining the Number of Kanbans in a Multiproduct Multistage Production System». *International Journal of Production Research*, 29, 5, 1991.

BERKLEY, B. J.: «A review of the Kanban production control research literature», *Production and Operations Management*, vol. 1, núm. 4, 1992.

BERKLEY, B. J.: «Setting Minimum Performance Levels for Two-Card Kanban-Controlled Flow Shop», *Decision Science*, 22, 3, 1993.

BITRAN, G. R., y CHANG, L.: «A Mathematical Programming Approach to a Deterministic Kanban System», *Management Science*, 33, 4, 1987.

DORE, R.: «British Factory, Japanese Factory», Ed. Allen y Unwin, 1973.

DRUCKER, P. F.: «¿Qué secreto se esconde detrás del triunfo económico del Japón?», *Harvard-Deusto Business Review*, tercer trimestre, 1981.

FERNÁNDEZ SÁNCHEZ, E.: «La administración de empresas en Japón», *Alta Dirección*, núm. 118, año 20, noviembre-diciembre 1984.

HALL, R. W.: «Estrategias modernas de fabricación», T. G. P., 1988.

HAYES, ROBERT H.: «¿Por qué funcionan las fábricas japonesas?», *Harvard-Deusto Business Review*, segundo trimestre, 1982.

MACHUCA, J. A. D.; ALVAREZ; M. J.; GARCÍA, S.; DOMÍNGUEZ, M. A. D., y RUIZ, A.: «Dirección de Operaciones. Aspectos estratégicos en la producción y en los servicios», McGraw-Hill, 1994.

MACHUCA, J. A. D., y LUNA, P.: «Just in time», en *El subsistema productivo de la empresa*, tercera edición, Pirámide, 1990.

MITRA, D., y MITRANI, I.: «Analysis of Kanban Discipline for Cell Coordination in Production Lines», I, *Management Science*, 36, 12, 1990.

MOOENI, F., y CHANG, Y.: «An Approximate Solution to Deterministic Kanban System», *Decision Sciences*, 21, 3, 1990.

MONDEN, Y.: «El sistema de producción de Toyota», Price Waterhouse e IESE, 1987.

RUIZ JIMÉNEZ, A.: «Aplicación de las técnica Just-in-time a la disminución de inventarios de la empresa», *Alta Dirección*, 158, 1991.

SUGIMORI, Y.; KUSUNOKI, K.; CHO, F., y UCHIWAKA: «Toyota Production System and Kanban system materialization of Just-In-Time and respect for human system», *International Journal of Production Research*, 15, 6, 1977.

TAKAYANAGI, S.: «Dirección Japonesa de Recursos Humanos», en *El estilo japonés de dirección de empresas*, TGP, 1989.

SHINGO, S.: «El sistema de producción de Toyota desde el punto de vista de la ingeniería», T. G. P., 1990.

VOLLMANN, T. E.; BERRY, W, L., y WHYBARK, D, C.: «Sistemas de planificación y control de la fabricación», TGP, 1991.

WANG, H.: «Optimum Number of Kanbans Between Two Adjacent Workstations in a JIT System», *International Journal of Production Economics*, 22, 3, 1991.

WEIS, A.: «Realidades de la industria japonesa», *Harvard-Deusto Business Review*, tercer trimestre, 1985.

[11] Debido a la íntima relación que mantienen los Capítulos 6 y 7, será en este último donde recojamos la bibliografía general de ambos, mencionando aquí sólo las referencias realizadas y la bibliografía más específica de los aspectos tratados en el Capítulo 6.

CAPITULO 7

LA FILOSOFIA «JUSTO A TIEMPO» (II): ADECUACION DEL SUBSISTEMA DE OPERACIONES Y OTROS ASPECTOS DE INTERES

7.1. REDUCCION DE LOS TIEMPOS DE PREPARACION (EL SISTEMA SMED) Y DE FABRICACION

En este primer apartado analizaremos cómo la disminución de los tiempos de preparación, a través del sistema SMED (*Single Minute Exchange of Die*) se convierte en una pieza clave para disminuir el tamaño de los lotes y, con ello, los tiempos de fabricación. Efectivamente, en su lucha por evitar cualquier tipo de despilfarro, la filosofía «Justo a tiempo» ataca frontalmente cualquier elemento del plazo de fabricación que no sea estrictamente necesario. A partir de la descomposición de éste en tiempo de espera entre procesos (incluye los que denominamos de cola y de espera en el Apartado 1.4.2.3), tiempo de transporte y tiempo de elaboración del lote (denominado tiempo de ejecución en 1.4.2.3) (Monden, 1987, pág. 76), el JIT analiza cada componente y propone medidas para reducirlos. Las estudiaremos de forma independiente.

El **tiempo de espera** puede tener dos orígenes. En primer lugar, puede producirse como consecuencia de desequilibrios en el tiempo de producción; por ejemplo, el proceso precedente puede tardar más que el siguiente en terminar una unidad de un artículo, con lo que este último tendrá que esperar hasta que le llegue el siguiente ítem a procesar. El JIT propone reducir este tiempo con una buena estandarización de la ruta de operaciones (ver Apartado 7.2) y con un perfecto entrenamiento de los trabajadores en la misma. Además, favorece los procesos de ayuda mutua entre operarios cuando algunos de ellos se encuentran retrasados (estos procesos serán analizados en apartados posteriores). La segunda causa que origina tiempos de espera es el tamaño de los lotes a procesar. Este tiempo de espera será directamente proporcional al tamaño del lote, pues cada uno de ellos tendrá que esperar la conclusión del anterior antes de comenzar con su primera operación. Aparte de reducir la dimensión de los lotes, también puede disminuirse el tiempo de espera reduciendo al máximo las cantidades de transferencia entre procesos, llegando a hacerlo, si es posible, unidad a unidad.

En lo que se refiere al **tiempo de transporte**, éste sería mínimo si toda la planta de producción funcionase como una línea equilibrada, donde el flujo entre procesos fuese unitario y cada unidad de producto terminado saliese de la línea al mismo tiempo que las distintas unidades semiterminadas pasan al proceso si-

guiente (concepto establecido en la línea de montaje de Ford). Lamentablemente, esto no suele ocurrir en la fabricación por lotes si las máquinas de igual función se agrupan en una misma sección[1]. En este supuesto, cuando un determinado taller termina sus labores sobre un lote de gran tamaño, éste se transfiere al siguiente, de aquí al siguiente y así sucesivamente hasta que el lote de piezas esté terminado. Aunque esta forma de fabricar puede tener algunas ventajas (ver J. A. D. Machuca y otros, 1994, Capítulo 9), incrementa el nivel de existencias en curso y también el tiempo total de fabricación. Por otra parte, cuando se utilizan grandes lotes, los tiempos de transporte se convierten en un componente importante del tiempo total de fabricación. El JIT propone como solución a este problema la conversión de estos trabajos por lotes en flujos de producción por unidades, conectándolos directamente con la línea de montaje. Para conseguir este objetivo no diseña las secciones por funciones, *sino en líneas multiproceso* (ver Apartado 7.3), donde un mismo operario polivalente maneja las diferentes máquinas necesarias para conseguir el artículo final (torno, taladro, fresa, etc.). De esta forma, al final de un ciclo de producción relativamente corto, y perfectamente sincronizado con los demás procesos, obtendremos un solo ítem que se incorpora a la línea de montaje. Ello reduce considerablemente el nivel de inventario en curso y disminuye el tiempo de ejecución total. Como es lógico, esto requiere una serie de cambios que estudiaremos en epígrafes posteriores, tales como: trabajar con una distribución en planta en forma de U, utilización de medios de transportes rápidos, trabajar con obreros polivalentes, etcétera.

Si observamos las soluciones propuestas *para la disminución* de los dos tiempos mencionados, *tiempo de espera y de transporte*, deduciremos que *es fundamental la reducción de la dimensión de los lotes de procesamiento*. Por otra parte, es evidente que cualquier disminución del tamaño del lote permitirá reducir proporcionalmente el **tiempo de ejecución** del mismo (tercer elemento del plazo de fabricación). Puede concluirse, por tanto, que *la disminución del tamaño del lote se convierte en la llave de cualquier proceso que intente reducir el plazo de fabricación.* Históricamente, el uso de grandes lotes nació como una solución maravillosa (Shingo, 1990b) para luchar contra las grandes ineficiencias originadas por los tiempos excesivamente largos de preparación de la maquinaria[2]: interrupción de las labores productivas de la máquina, obreros parados, concurso de un especialista, etc. Todo esto obligaba a producir grandes series de productos para repartir estas ineficiencias, disminuyendo así el coste medio y el tiempo de fabricación unitario. Sin embargo, con esta forma de actuar, se ha luchado una vez más contra los efectos y no contra las causas de los problemas, ya que la verdadera razón de los grandes reagrupamientos es la propia necesidad de hacer tediosas preparaciones para pasar a la fabricación de una nueva serie de productos. Al cambiar de enfoque y luchar contra la raíz de los problemas, el JIT crea un sistema de cambios rápidos, el SMED, que *al reducir drásticamente los tiempos de preparación deja sin consistencia la necesidad de trabajar con grandes lotes de producción.*

El **sistema SMED** nace como un conjunto de conceptos y técnicas que pretenden reducir los tiempos de preparación hasta poderlos expresar en minutos utilizando sólo un dígito, es decir, realizar cualquier preparación de máquinas en un tiempo inferior a los 10 minutos. Según su creador, Shigeo Shingo, el sistema

[1] Distribución en planta por funciones (ver J. A. D. Machuca y otros, 1994, Capítulo 9).

[2] Tiempo que transcurre entre el último ítem de un lote de tipo A y la producción del primer ítem «bueno» de un lote de tipo B.

dio sus primeros pasos en ciertos trabajos que le fueron encargados, en 1950, en la fábrica Toyo Kogyo de Mazda. Sin embargo, se desarrolló completamente alrededor de los años setenta cuando realizaba trabajos para la empresa Toyota y ésta adoptó el sistema como uno de los pilares básicos de su modo de fabricación. Habría que añadir que el sistema SMED debe ser considerado como un método de mejora continua, de forma que cualquier empresa que lo adopte debe realizar esfuerzos para conseguir preparaciones de un solo golpe (OTED: *One Touch Exchange of Die*) o de una duración inferior al minuto. La Tabla 7.1 recoge algunos resultados de la aplicación del sistema SMED, y el Cuadro 7.1 las fases conceptuales involucradas en su aplicación.

Tabla 7.1. Algunos resultados del sistema SMED

Máquinas	Tiempos de preparación	
	Antes	Después
Torno VDF de control numérico	1 hora y 28 minutos	8 minutos
Prensa (matriz de un solo golpe)	1 hora y 30 minutos	4 minutos y 31 segundos
Conformadora de plástico	6 horas y 40 minutos	7 minutos y 36 segundos
Prensa plegadora Colly	1 hora y 10 minutos	9 minutos
Máquina de moldeo a presión	1 hora y 20 minutos	7 minutos y 46 segundos
Prensa de inyección plástica	1 hora y 52 minutos	9 minutos
Prensa Cofmo, 100 t	1 hora y 25 minutos	5 minutos

Queremos añadir que el final de estos procesos de mejora debería consistir en la eliminación misma de la necesidad de preparación: «*El modo más rápido de cambiar una herramienta es no cambiarla de ninguna forma*» (Shingo, 1990a, página 101). Esta eliminación puede implicar dos aspectos (O'Grady, 1992, pág.71): estandarizar los componentes para que puedan ser utilizados en distintos productos o bien fabricar las piezas necesarias al mismo tiempo, ya sea en la misma máquina o en máquinas diferentes (por ejemplo: moldear dos piezas diferentes con un mismo troquel de prensa y separarlas posteriormente). Otra solución es fabricarlas separadamente utilizando máquinas de bajo coste. En el Cuadro 7.2 recogemos algunos ejemplos reales de aplicación del sistema SMED.

Resumimos a continuación algunas de las ventajas derivadas de todo proceso que acorte los tiempos de preparación de la maquinaria:

- Al permitir la disminución del tamaño de los lotes y, por tanto, del tiempo de fabricación, se posibilitan reducciones importantes del nivel de inventarios, a la vez que se otorga mayor flexibilidad a la empresa para adaptar la producción a las fluctuaciones y modificaciones de la demanda.
- Al disminuir los tiempos improductivos de los cambios, aumenta la tasa de utilización de la maquinaria y la productividad.
- Al permitir plazos de fabricación y entrega muy cortos, la empresa puede dejar de fabricar para almacén y adaptar su fabricación a los pedidos reales de los clientes.
- Cuando se trabaja con tamaños de lotes muy grandes, puede darse el caso de que un problema de calidad sea detectado cuando el lote ya haya recibido las primeras operaciones del proceso, originando importantes pérdidas de tiempo y reproceso. Al trabajar con lotes más pequeños, los problemas de calidad son más rápidamente detectados y afectan a menor número de piezas.

Cuadro 7.1. Fases conceptuales involucradas en las mejoras de la preparación de máquinas y técnicas de ayuda (Shingo, 1990a, pág. 90 y ss.)

Fases para obtener mejoras en los tiempos de preparación

Fase 1. Distinguir los conceptos de preparación interna y externa

Existen labores de preparación que deben realizarse cuando la máquina está parada (preparación interna) y otras que pueden ser realizadas con la máquina en funcionamiento (preparación externa). El problema nace cuando en las empresas se confunden preparaciones internas con externas, lo cual provoca que la máquina esté parada más tiempo del estrictamente necesario, decrementando su tiempo de utilización productiva. Para abordar esta primera etapa y avanzar posteriormente en la implantación del sistema SMED es necesario realizar un exhaustivo estudio de los procesos y tiempos actualmente utilizados en las labores de preparación.

Fase 2. Separar claramente la preparación interna y externa

La separación rigurosa de estos dos tipos de preparación se convierte en el pasaporte para alcanzar el sistema SMED. Así, por ejemplo, la búsqueda, preparación y ordenación de las herramientas y materiales necesarios para la preparación son labores que deben ser realizadas mientras que la máquina está en marcha (no siempre sucede así en la realidad), mientras que la preparación interna debe limitarse exclusivamente a retirar los útiles o herramientas anteriores y fijar los nuevos. Simplemente separando y organizando las operaciones internas y externas, el tiempo de preparación con máquina parada puede ser reducido de un 30 a 50 por 100.

Fase 3. Convertir la preparación interna en externa

Este tercer aspecto es fundamental para conseguir tiempos de preparación de un solo dígito. Para hacer posible esta conversión debemos analizar todas las labores internas de preparación (comprobando que ninguna de ellas se ha catalogado así por error) e intentar transformarlas en actividades que sea posible realizar con la máquina en marcha.

Fase 4. Centrar los esfuerzos en perfeccionar todos los aspectos de la operación de preparación.

Técnicas de ayuda para implantar las fases de mejora

a) *Estandarizar la operación de preparación* en la medida de lo posible y siempre que ello sea rentable. De esta manera se irá transformando en una operación de rutina.

b) *Utilizar sistemas de fijación de sujeción rápida.*

c) *Adoptar medios de preparación en paralelo.* Existen procesos de preparación que deben ser realizados inevitablemente en distintos lados de la máquina. La utilización en estas tareas de dos operarios podría reducir el tiempo de preparación en más de la mitad debido a la economía en los movimientos, lo que aumentaría el tiempo de operación de la máquina, manteniendo el mismo o menor número de horas-hombre empleadas.

d) *Eliminar los ajustes.* Tradicionalmente, una vez preparada la máquina, es frecuente realizar operaciones de ensayo y ajustes hasta que la preparación se admite como idónea. Estas pruebas consumen entre el 50 y el 70 por 100 del tiempo de preparación a máquina parada, por lo que es fundamental su eliminación utilizando procesos de montaje de los nuevos útiles o herramientas que sean extraordinariamente precisos o eliminen en sí mismos la necesidad de ajuste.

e) *Mecanizar algunos procesos de preparación,* sobre todo aquellos que requieren el movimiento de útiles pesados. Sin embargo, según Shigeo Shingo, la mecanización sólo debe considerarse después de haber ensayado el resto de técnicas de mejora, ya que éstas pueden reducir el tiempo de preparación en porcentajes mucho mayores que el propio proceso de mecanización.

Mientras que otros elementos del JIT pueden despertar ciertas dudas a la hora de su posible éxito en empresas no japonesas, es evidente que el sistema SMED, por su aspecto técnico y por las grandes ventajas que ofrece, se convierte en un posible punto de arranque para aquellas empresas occidentales que deseen acercarse a la fabricación «Justo a tiempo». Además, si se implica en los procesos de mejora a todo el personal de la empresa, el coste monetario de su implantación será escaso y añadirá a las ventajas anteriores un gran aumento de la moral de los trabajadores, predisponiéndolos para aceptar otros retos en otras áreas de la fábrica.

Cuadro 7.2. Algunos ejemplos de la aplicación del sistema SMED

Caso 1 (Shingo, 1990b, pág. 93):

En el proceso de ensamblado automático de lavadoras se instalaban topes de posicionado en el palet sobre el que se iban colocando las lavadoras, topes que había que cambiar siempre que se variaba de modelo de lavadora (existían cuatro modelos distintos). La operación se modificó colocando en las esquinas del palet cuatro topes a los que se hacía girar automáticamente antes de iniciar el montaje (Figura 7.1). Debido a que la anchura y profundidad eran diferentes en cada modelo, los topes giratorios se construyeron con las muescas correspondientes a estas diferencias. Los topes podían ser rotados fácilmente hasta la posición correcta. Esta modificación convirtió la preparación en algo sencillo, eliminando la necesidad de trabajo humano. Se adoptó la producción de pequeños lotes, sin que aparecieran problemas por el mayor número de preparaciones necesarias.

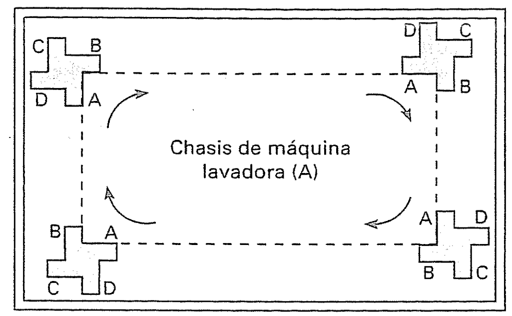


Figura 7.1. Posicionamiento del chasis de las lavadoras.

Caso 2 (Monden, 1987, pág. 88):

Una máquina moldeadora requería diferentes recorridos de prensa, según el troquel utilizado, para cada uno de los cinco modelos de producto fabricados. El cambio de posición de un interruptor era el que marcaba la longitud del recorrido, por lo que era necesario ajustarlo hasta encontrar la posición correcta. Esta labor de ajuste siempre era una operación necesaria. En este caso, se instalaron cinco interruptores en lugar de uno solo para las cinco posiciones, haciendo además que con una sola pulsación la corriente eléctrica circulase hasta el interruptor necesario en cada momento. Con ello se eliminó completamente la necesidad de ajuste (ver Figura 7.2).

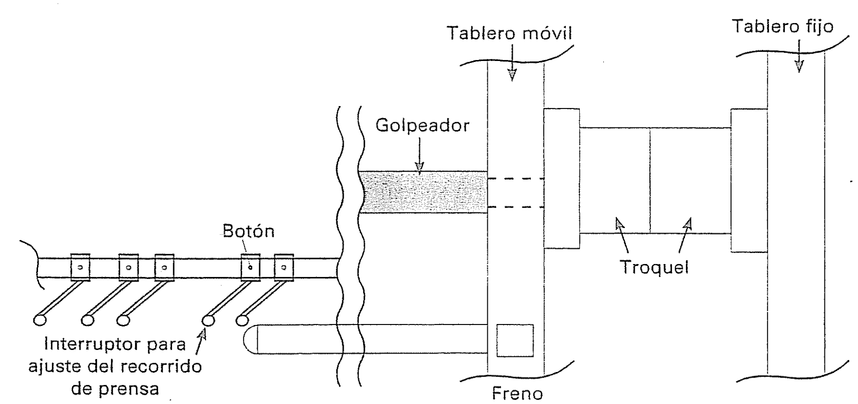


Figura 7.2. La colocación de interruptores en una prensa elimina la necesidad de ajuste.

Por último queremos señalar que el tiempo de preparación externo, con la máquina en marcha, se convierte en el elemento decisivo para la fijación del tamaño del lote de procesamiento, ya que determina el tiempo y, por tanto, el número de items que la máquina debe realizar antes de poder pasar a fabricar otro tipo de piezas distintas (Monden, 1987, pág. 193).

7.2. ESTANDARIZACION DE LAS OPERACIONES

Varias veces, a lo largo de apartados anteriores, hemos hecho referencia a la importancia de estandarizar las operaciones dentro de una fabricación «Justo a tiempo»; por ejemplo, como instrumento necesario para equilibrar la línea de producción y reducir los tiempos de espera. Para Monden (1989, pág. 86), la estandarización de operaciones consiste, principalmente, en determinar el orden secuencial de las mismas que ha de ejecutar un operario polivalente al manejar distintas máquinas, de forma que se obtengan los siguientes objetivos:

- Una alta productividad por utilizar el mínimo de trabajadores posible y *eliminar todas las tareas o movimientos inútiles.*
- *Equilibrar todos los procesos en términos de tiempo de producción.* Para ello se basa en la utilización del concepto de ciclo de fabricación.
- *Utilizar la mínima cantidad posible de trabajo en curso,* a la cual denomina cantidad estándar de trabajo en curso.

Además, en la estandarización de operaciones se ha de tener en cuenta la seguridad de los trabajadores y la calidad del producto. Para conseguir estos objetivos, la estandarización de operaciones trabaja con tres elementos básicos: *ciclo de fabricación de un ítem, ruta estándar de operaciones de un operario y cantidad estándar de trabajo en curso.*

El **ciclo de fabricación de un ítem** ser define de forma análoga a la realizada en el Ejemplo 6.1. Como ya analizamos en el Capítulo 6, esta información, suministrada de forma anticipada, servirá a los responsables de cada departamento para preparar sus instalaciones, materiales y personal de forma que se pueda alcanzar este ciclo de fabricación utilizando el mínimo de trabajadores, redistribuyendo a éstos en caso necesario.

Si además del ciclo de fabricación conocemos la cantidad de horas-hombre requerida por las distintas operaciones, podremos determinar el número de éstas a realizar por cada trabajador. Precisamente **la ruta estándar de operaciones de un operario** es el orden de las acciones a llevar a cabo por cada trabajador en un determinado ciclo (ver Figura 7.3).

Esta no tiene por qué corresponderse con la ruta de un ítem o secuencia de operaciones conducentes a obtenerlo que vimos en el Capítulo 2. En el Ejemplo 7.1 podemos observar cómo se realiza la división de las tareas de esta última entre una serie de trabajadores (división que se concreta en sus respectivas hojas de ruta estándar) de forma que se consiga una perfecta sincronización de sus actividades.

Como se deduce del ejemplo mencionado, si los trabajadores realizan sus correspondientes operaciones en el tiempo asignado, al final de cada ciclo saldrá una pieza terminada de la línea, estando ésta perfectamente equilibrada en tiempo. Sin embargo, también se desprende que siempre que la ruta estándar de cada trabajador no siga la secuencia lógica de operaciones a realizar al producto, será necesario mantener cierta cantidad de trabajo en curso entre máquinas (además de las que se están procesando en las mismas) para que éstas y los distintos trabajadores puedan operar de forma simultánea. A esta cantidad, que debe ser calculada para que sea la mínima, se la denomina **cantidad estándar de trabajo en curso** (no incluye las existencias en los almacenes de productos terminados). En el ejemplo anterior puede observarse que sería suficiente mantener sólo cuatro unidades de productos en curso entre máquinas; concretamente: una pieza P2 entre las operaciones 2 y 3, una pieza P3 entre las operaciones 3 y 4, una pieza P6 entre las operaciones 6 y 7 y una pieza P8 entre las operaciones 8 y 9.

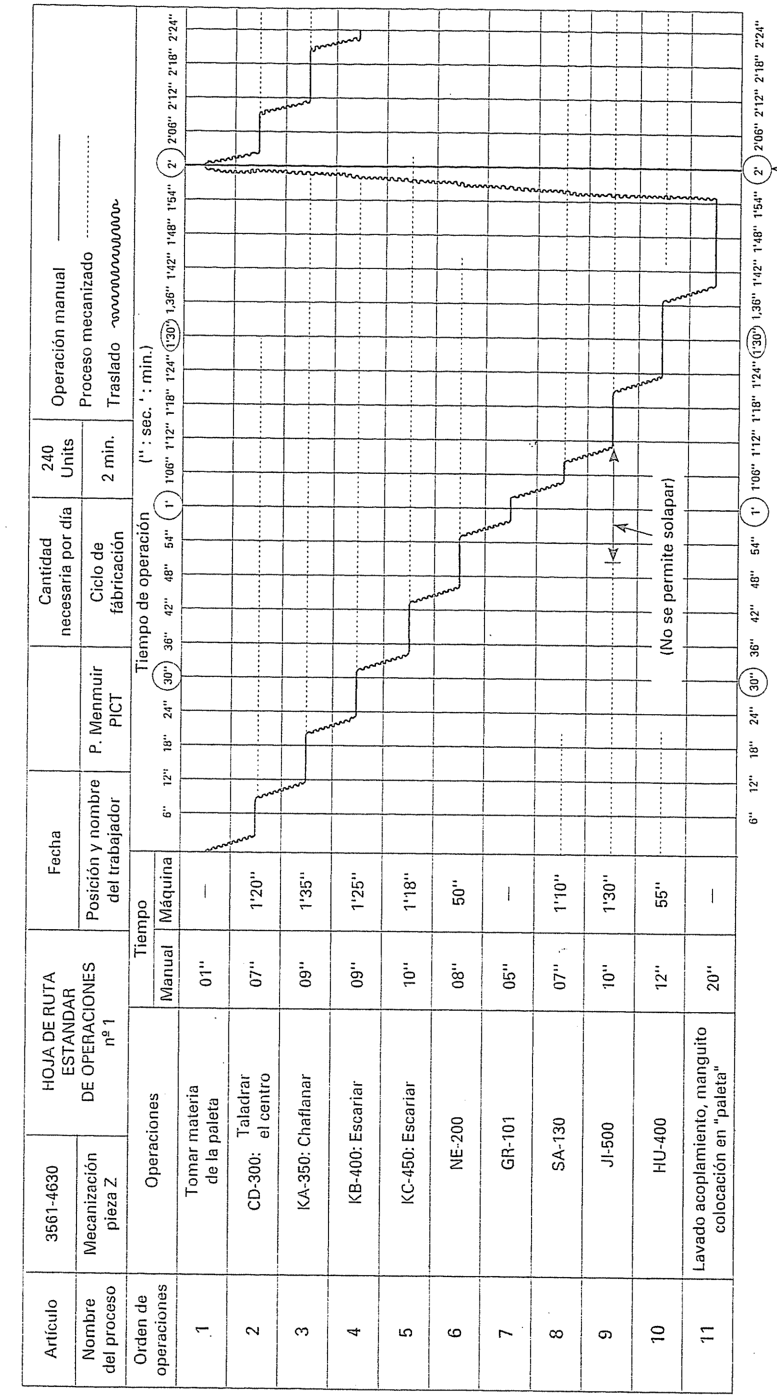
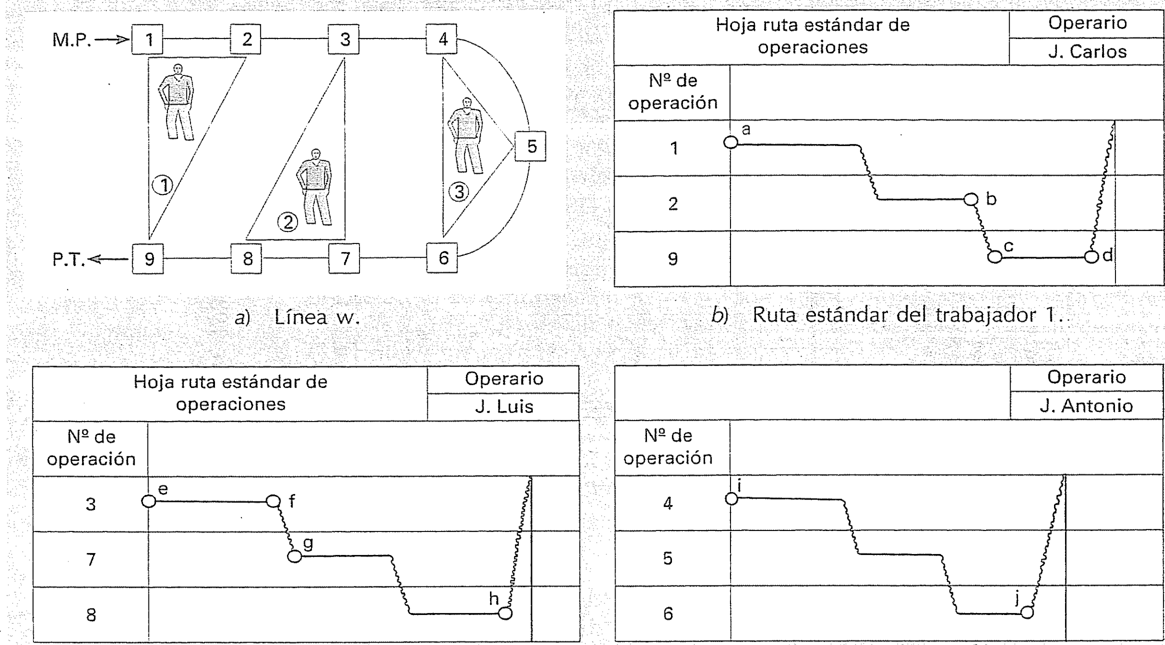


Figura 7.3. Hoja ruta estándar de operaciones (Monden, 1987, pág. 103).

EJEMPLO 7.1. Un ejemplo sencillo de estandarización de operaciones

Supondremos que para obtener una determinada pieza en la línea *W* se necesita realizar nueve operaciones y que, para cumplir el ciclo de fabricación, han sido adscritos a dicha línea tres trabajadores, asignándoles las tareas reseñadas en sus respectivas hojas de ruta estándar. En ellas se observa que si se cumplen los tiempos asignados, existirá una perfecta sincronización de las actividades de la línea.



a) Línea w. *b)* Ruta estándar del trabajador 1.

c) Ruta estándar del trabajador 2. *d)* Ruta estándar del trabajador 3.

Figura 7.4. Un ejemplo sencillo de estandarización de operaciones: *a)* incorpora nueva MP; *b)* deja una pieza P2; *c)* toma una pieza P8 del inventario en curso; *d)* obtiene un producto terminado; *e)* toma una pieza P2 que estaba como inventario en curso; *f)* deja una pieza P3 en inventario en curso; *g)* toma una pieza P6 del inventario en curso; *h)* restituye la pieza P8 para inventario en curso; *i)* toma una pieza P3 del inventario en curso; *j)* restituye la pieza P6 al inventario en curso.

Además de reducir los tiempos de espera, una buena estandarización de las operaciones que consiga un perfecto equilibrado de las mismas permitirá reducir los stocks de seguridad que, en otras condiciones, habría que mantener para eliminar incertidumbres sobre el tiempo de fabricación.

7.3. CAPACIDAD DE ADAPTACION A LA DEMANDA MEDIANTE FLEXIBILIDAD: SHOJINKA

Las empresas suelen tener más de un producto final con demanda independiente, lo que posibilita que, en determinados momentos, puedan subir los pedidos de

algunos de ellos y bajar los de otros. Ante una circunstancia de este tipo, por ejemplo un descenso de demanda de algún ítem final, la nivelación en las cargas de trabajo y la productividad pueden verse afectadas. Ello podría provocar despilfarros si seguimos manteniendo la misma capacidad de producción en aquellas líneas que ahora tienen menores requerimientos. El JIT intenta evitar estas situaciones implantado el concepto de **Shojinka**, definido como la *flexibilidad en el número de trabajadores de una determinada línea para adaptarse a los cambios de demanda*, manteniendo o aumentando así su productividad. En la práctica, Shojinka significa que si la demanda de un determinado producto desciende un cierto tanto por ciento, el número de trabajadores asignados a su elaboración debe disminuir en la misma proporción. Es evidente que, para conseguir dicha flexibilidad, es necesario contar con una serie de requisitos en el diseño del Subsistema Productivo. Concretamente: una distribución en planta adecuada, un personal altamente formado y polivalente y una mejora continua de la ruta estándar de operaciones

7.3.1. Distribución en planta en forma de U

El JIT intenta evitar en sus plantas de producción las organizaciones por procesos con talleres que agrupan las máquinas de igual función. Este tipo de organización, propio de la fabricación bajo pedido no repetitiva, que admite como inevitable la complejidad en los procesos productivos y la fabricación por lotes (ver J. A. D. Machuca y otros, 1994, Capítulo 9) genera una serie de inconvenientes poco asumibles en una filosofía como el JIT, que intenta eliminar todo tipo de despilfarro: largos tiempos de espera y transportes, movimientos inútiles, gran cantidad de productos en curso, riesgo de deterioro, largos tiempos de fabricación, dificultades de planificación y control, etc. Pero, sobre todo, el mayor inconveniente es el de no facilitar el ajuste y la reprogramación de los recursos humanos para adaptarse a posibles cambios de demanda. En su intento por simplificar la complejidad de la fábrica, la filosofía JIT propone organizarla de forma que se faciliten los flujos simples y unidireccionales de material dentro de la misma. Para ello agrupa en familias tecnológicas las piezas cuyos modos de fabricación presentan similitudes (ciclos o partes de ciclos análogos o parecidos) y después constituye células dedicadas a la fabricación de una gama reducida de ellas, reagrupando y acercando las máquinas que permiten efectuar las operaciones sucesivas de igual familia (ver Companys, 1989, y J. A. D. Machuca y otros, 1994, Capítulo 9). En definitiva, organizando la fábrica en líneas de flujos basadas en los productos intenta que ésta se adapte a un flujo nivelado de producción. Sin embargo, no todas las disposiciones por líneas de flujos son igualmente eficaces para conseguir Shojinka (J. A. D. Machuca y otros, 1994, Capítulo 9), siendo la más adecuada aquella que ha dado en llamarse **distribución en planta en forma de U**, cuya principal característica es que los *puestos de entrada y salida de la línea se encuentran en paralelo* y normalmente manejados por el mismo operario (ver Figura 7.5).

Las principales ventajas de esta distribución en células en forma de U son las siguientes:

- La reducción de las distancias entre las distintas máquinas facilita que un mismo operario pueda acceder a varias de ellas. Ello proporciona una gran flexibilidad para adaptarse a cambios en la demanda, aumentando o disminuyendo el número de trabajadores dentro de una línea y el número de

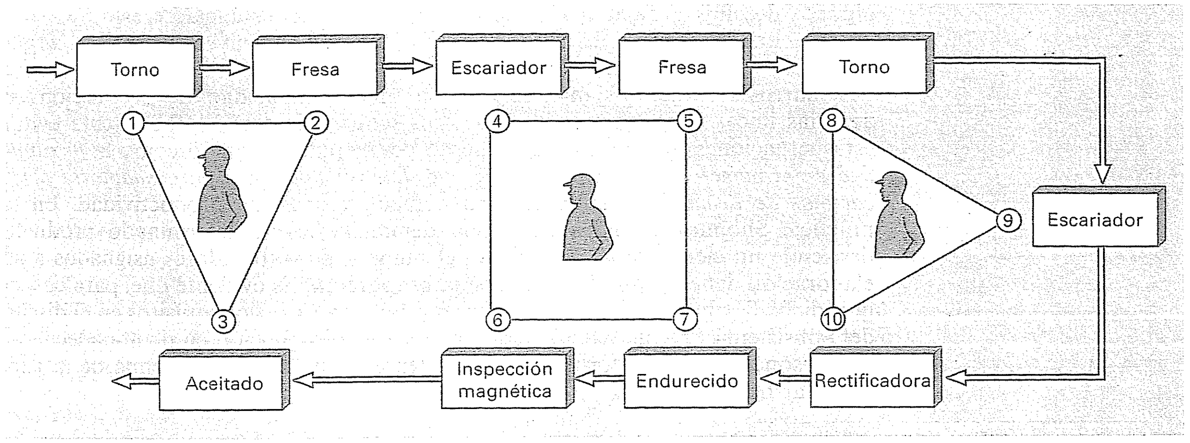


Figura 7.5. Distribución en planta en forma de U.

máquinas manejado por cada uno de ellos. Como veremos en el Apartado 7.3.2, esto requiere un elevado grado de polivalencia de los trabajadores.

- Ayuda a reducir la cantidad de existencias de productos en curso. Además, dicha cantidad permanecerá constante dentro de la célula si el mismo trabajador que introduce un nuevo ítem en la primera máquina es el encargado de sacar otro acabado en la última.
- Por la razón mencionada anteriormente, y por facilitar el control visual debido a la cercanía de los distintos puestos de trabajo, es muy fácil controlar los desequilibrios que puedan producirse dentro de la U, ya que cualquier problema que retrase la salida del siguiente ítem terminado será fácilmente detectable.
- Al estar cada célula dedicada a la fabricación de una gama estrecha de items con características similares, disminuyen los tiempos de preparación de la maquinaria.
- Facilita la comunicación y la ayuda mutua al estar los trabajadores físicamente muy cerca unos de otros, lo cual es fundamental para un buen equilibrado de la línea.

Para conseguir la máxima flexibilidad, toda la planta, en la medida de lo posible, debe estar organizada como una combinación de líneas en U, de forma que se asemeje a un proceso continuo donde los elementos que intervienen son las células de fabricación. Estas transformarán sus entradas en salidas y, a su vez, alimentarán a las células que las suceden (ver Figura 7.6). Entre otras ventajas, esta combinación elimina el problema de los números fraccionarios a la hora de asignar trabajadores a las distintas líneas, ya que una misma persona puede desarrollar funciones en más de una de ellas[3].

En el supuesto recogido en el Ejemplo 7.2 podemos observar cómo la combinación de líneas facilita la reasignación de operarios entre ellas para adaptarse mejor a posibles cambios en la demanda.

[3] Las fases de cualquier proceso conducente a conseguir una organización de la planta en células en forma de U pueden verse en J. A. D. Machuca y otros (1994, Capítulo 9).

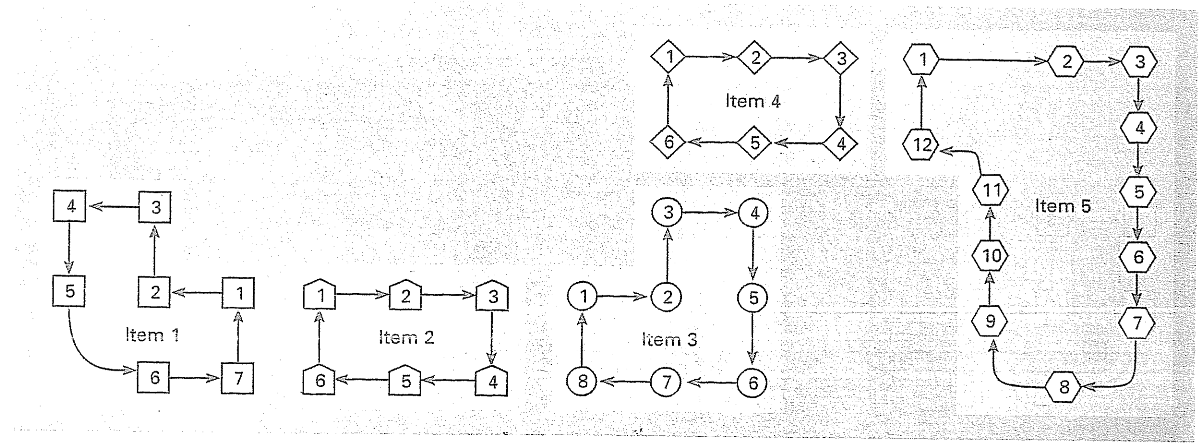


Figura 7.6. Planta de producción distribuida como combinación de líneas en forma de U.

EJEMPLO 7.2. Un ejemplo de adaptación a la demanda mediante reasignación de trabajadores entre las distintas líneas

Nos situaremos de nuevo en la planta representada en la Figura 7.6. Supondremos que la demanda para el mes actual obliga a desarrollar un ciclo de fabricación (ver Epígrafe 7.2) de un minuto y que, realizados los análisis previos pertinentes, ello se ha conseguido con la asignación a la línea de seis trabajadores, los cuales desarrollan las tareas recogidas en la Figura 7.7.

Supondremos ahora que la demanda para el mes próximo ha experimentado un decremento que sitúa el ciclo de fabricación necesario en 1,1 minutos. Ello implica que, de mantener el número de trabajadores actualmente asignados a la línea, se resentirá la productividad de la misma. Al contar con obreros polivalentes y una distribución en planta adecuada, el JIT acomete el problema reasignando a los trabajadores dentro de las distintas líneas, separando a algunos de la línea mencionada y repartiendo sus tareas entre los trabajadores restantes. Una posible solución podría ser la representada en la Figura 7.8, donde se observa que la producción de los seis items es realizada ahora por sólo cinco trabajadores, ocupándose cada uno de ellos del manejo de mayor número de máquinas.

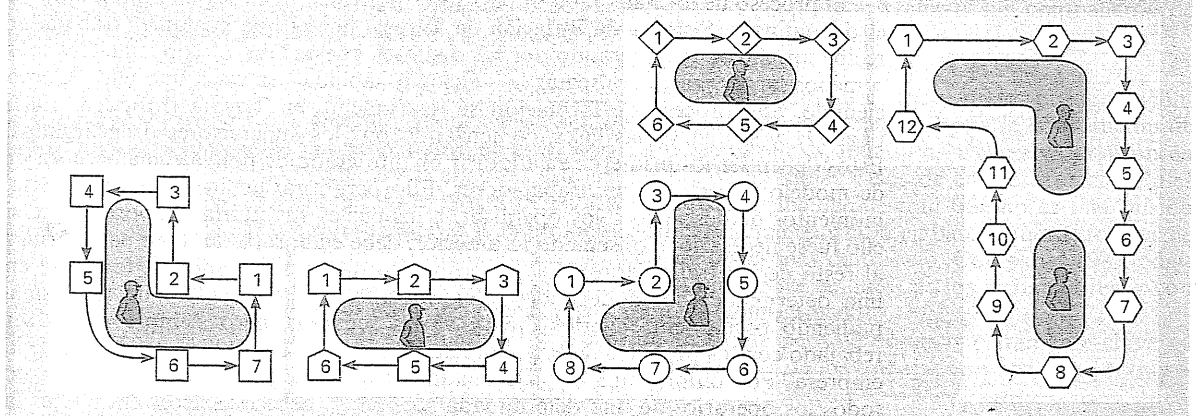


Figura 7.7. Asignación de seis trabajadores para conseguir un ciclo de fabricación de un minuto.

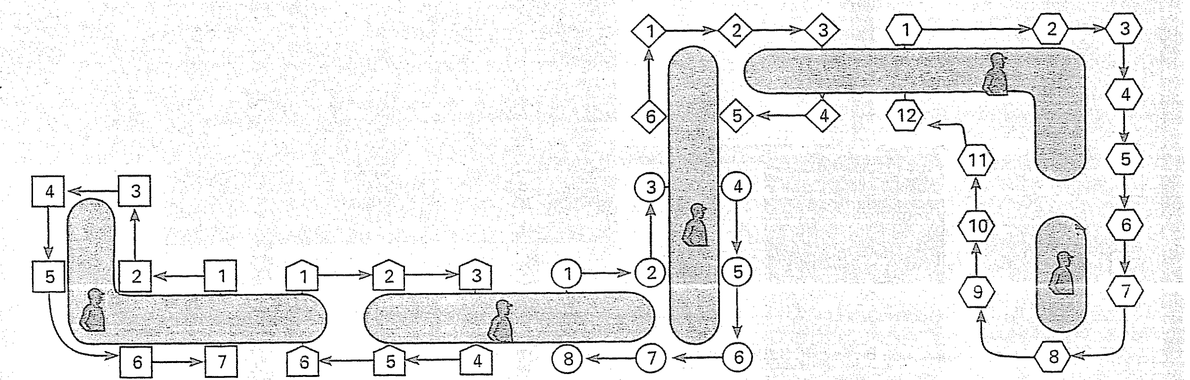


Figura 7.8. Una nueva asignación de trabajadores para adecuarse al nuevo ciclo de fabricación.

7.3.2. La polivalencia de los trabajadores

Del apartado anterior se desprende que, para conseguir flexibilidad en las adaptaciones a los cambios de demanda, es necesario que el número de operarios dentro de una determinada célula pueda variar, adaptándose a las necesidades reales de cada momento. Desde el punto de vista del trabajador, esto significa que puede ver alterada su ruta estándar de operaciones, incrementándose o disminuyéndose el número de tareas a realizar o, simplemente, modificándose el orden o contenido de las mismas. Lógicamente, estos cambios en los cometidos de los operarios no se podrían realizar, al menos de forma rápida, si éstos no fuesen multifuncionales, es decir, si no estuviesen formados para desarrollar una amplia gama de trabajos. La polivalencia de los trabajadores, junto con la distribución en planta en forma de U, son los dos factores críticos para conseguir una alta flexibilidad y asegurar el éxito de cualquier implantación de la filosofía «Justo a tiempo».

El proceso de formación de trabajadores polivalentes en Japón está basado en el denominado **Sistema de Rotación de Tareas**, por el que cualquier trabajador recibe formación y va rotando por los distintos puestos de trabajo, en ciclos más o menos largos, hasta conseguir la suficiente habilidad en cada uno ellos. Como ejemplo, este proceso de formación se instrumenta en Toyota (Monden, 1987, pág. 121 y ss.) en varias fases, comenzando por los supervisores o encargados. Estos deben ser los primeros en adquirir un alto grado de polivalencia para servir de modelo al resto de los trabajadores. Ello permitirá facilitar, posteriormente, momentos de descanso a los operarios, a los cuales sustituiría temporalmente si ello fuese necesario. Conseguido lo anterior, debe elaborarse un plan para formar al resto de los trabajadores. El tiempo que tarda un trabajador en formarse en una determinada tarea dependerá, lógicamente, de la dificultad de la misma, pudiendo oscilar entre varios días y varias semanas, pero siempre podrá ser rebajado con los procesos de estandarización y mejora de las distintas tareas de la empresa. Por último, una vez alcanzado un elevado grado de polivalencia en todos los operarios de una determinada sección, se debe establecer entre ellos la mencionada rotación; ésta puede llevarse a cabo por períodos semanales, diarios, o incluso en intervalos de pocas horas. Esta filosofía de rotación en distintos

puestos se aplica a todos los niveles de la empresa, incluyendo la alta dirección. Las Tablas 7.2 y 7.3 recogen dos ejemplos de rotación.

Tabla 7.2. Rotación de los trabajadores del taller 523 de la fábrica Tsutumi de Toyota (Monden, 1987, pág. 126)

Rotación	Intervalos de tiempo \ Proceso n.º	1	2	3	4	5	6	7	8
1	8AM-10AM	A	B	C	D	E	F	G	H
2	10AM-12AM	G	A	B	C	D	H	E	F
3	1PM- 3PM	E	G	C	A	B	F	D	H
4	3PM- 5PM	D	C	G	B	A	H	F	E
5	5PM- 7PM	B	D	C	F	E	A	G	H

Tabla 7.3. Media de años de permanencia de los directivos japoneses en el mismo puesto de trabajo en función del tamaño de la empresa (Takanayagi, 1989a)

Departamento \ N.º de empleados (NE)	NE ≤ 999	1.000 ≤ NE ≤ 4.999	5.000 ≤ NE	Media
Dirección/Planificación	6,16	5,26	4,09	5,17
Ventas	6,10	5,00	3,91	4,97
Producción	6,27	4,87	4,28	5,50
Investigación	7,59	6,12	5,19	6,22

Entre las ventajas que conlleva la aplicación de este sistema de rotación de tareas y, en definitiva, de la formación de obreros polivalentes, pueden citarse (Monden, 1987, pág. 126):

- Al rotar entre distintos puestos, el trabajador permanece más alerta y atento al trabajo realizado. Ello conlleva una disminución importante de los accidentes laborales y propicia aumentos de productividad.
- Al aumentar su motivación y disminuir la monotonía, las actitudes de los trabajadores suelen hacerse más favorables.
- Al realizar todos los trabajadores cada una de las tareas en algún momento, ninguno de ellos se sentirá perjudicado en la asignación de las mismas.
- Por conocer cada trabajador las tareas que realizan sus compañeros de sección, se facilitan los procesos de ayuda mutua.
- Aumenta el grado de responsabilidad en el trabajo.

A pesar de sus indudables ventajas, las empresas occidentales pueden encontrar dificultades a la hora de avanzar convenientemente hacia la consecución de obreros polivalentes y, por tanto, de Shojinka, debido a la excesiva división en categorías laborales. Sin embargo, los múltiples casos de empresas occidentales que han conseguido resultados satisfactorios demuestran que no es una misión imposible; eso sí, la implantación habrá que realizarla en base a nuevas formas de organización, fundamentalmente de los grupos de trabajo (Companys,1989, página 120), con un amplio diálogo con los representantes de los trabajadores, y con la utilización de una buena política de incentivos.

El Ejemplo 7.3[4] muestra un caso que permite observar claramente el efecto beneficioso que puede tener la polivalencia de los trabajadores sobre la productividad de una determinada línea.

[4] Adaptado de Hall (1988, pág. 132).

EJEMPLO 7.3. Incremento en la productividad mediante reasignación de trabajadores y eliminación de tiempos innecesarios

Supongamos que nos encontramos en un determinada línea de producción en la que cinco trabajadores realizan las operaciones necesarias para obtener un determinado componente. En el momento actual podemos suponer que el ciclo de trabajo se encuentra situado en un tiempo de 54 segundos, disponiendo los trabajadores de cierto tiempo ocioso, tal como muestra la Figura 7.9. Siempre que se intentase mejorar la productividad de esta línea siguiendo un enfoque tradicional, lo habitual podría ser atacar las actividades del trabajador 1 (cuello de botella actual), reduciendo de esta forma el ciclo de fabricación y el tiempo ocioso de los demás trabajadores. Por ejemplo, podríamos disminuir el ciclo de fabricación a 45 segundos, tal y como muestra la Figura 7.10.

Sin embargo, bajo una filosofía como el JIT, esta solución no sería buena si la disminución del ciclo de fabricación diese lugar a una sobreproducción innecesaria para la demanda actual. Según el JIT, siempre que no hayan cambiado los requerimientos de la demanda, una primera solución vendría de mantener el mismo ciclo de fabricación e intentar eliminar el tiempo ocioso existente distribuyendo mejor las operaciones entre los distintos trabajadores. Una solución podría ser la recogida en la Figura 7.11, donde se ha eliminado el tiempo improductivo de los trabajadores 2, 3 y 4 y se ha reducido la tarea del trabajador número 5 a sólo seis segundos. Sin embargo, ésta no sería la solución definitiva; ésta debe provenir del estudio de todas las tareas realizadas en la línea, proponiendo las mejoras necesarias para lograr eliminar aquellas actividades actuales que resultan innecesarias y lograr así prescindir de las realizadas por el trabajador número 5. Con ello se habrá reducido el número de obreros necesarios en esta actividad, incrementado sustancialmente la productividad de la línea (ver Figura 7.12).

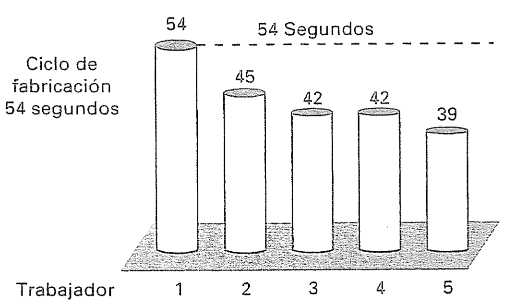


Figura 7.9. Situación actual de la línea.

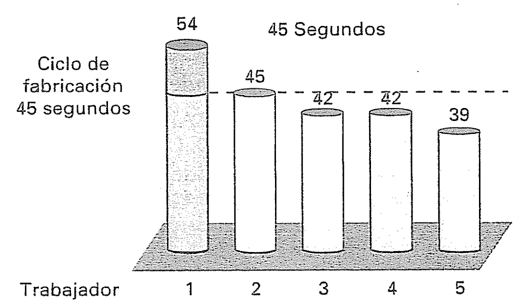


Figura 7.10. Una solución clásica.

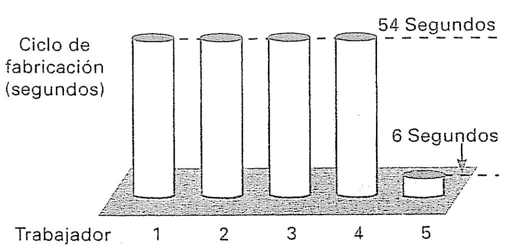


Figura 7.11. Una primera solución.

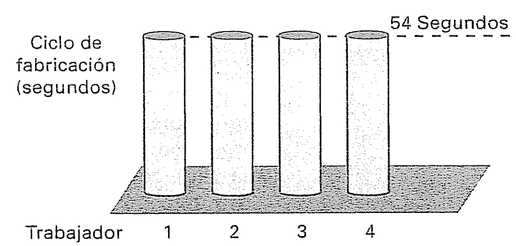


Figura 7.12. La solución definitiva.

7.4. PROGRAMAS DE RECOGIDA Y APROVECHAMIENTO DE LAS IDEAS Y SUGERENCIAS DE LOS TRABAJADORES PARA MEJORAR LAS OPERACIONES E INCREMENTAR LA PRODUCTIVIDAD: SOIKUFU

El enfoque JIT dedica grandes esfuerzos a incrementar la productividad de la planta a través de mejoras graduales en el proceso productivo, pero igual énfasis pone en desarrollar estas mejoras conservando un gran respeto por la dimensión humana. El convencimiento de que son los trabajadores los que mejor conocen las distintas operaciones de producción, hace que se les otorgue participación y protagonismo en cualquier proceso de mejora, instrumentando una serie de mecanismos para aprovechar sus ideas y sugerencias en beneficio de la empresa y del propio trabajador. En los aspectos técnicos del incremento de productividad, el JIT dirige las mejoras tanto al perfeccionamiento de las operaciones manuales como a las realizadas por la maquinaria. Con respecto a las primeras, intenta en todo momento eliminar las de carácter innecesario (tiempos de espera, transportes dobles, etc.) y disminuir aquellas otras, nacidas de un mal diseño del proceso productivo, que no aportan valor añadido (grandes desplazamientos, desempaquetado de envases de los proveedores, cambios de herramientas de una mano a otra, etc.). Además, con cualquier modificación o eliminación de las tareas actuales, se intenta reasignarlas entre los trabajadores de forma que se reduzca el número de éstos asignado a una determinada línea de producción (ver Ejemplo 7.3).

En una segunda fase de mejora, sería considerado cualquier proceso que implicase una mayor automatización de la planta a través de la introducción de nuevos equipos o de nueva tecnología. Si ésta se acepta, se aconseja que las máquinas sean de tipo universal y de bajo coste, pues ello facilitaría una respuesta flexible a los cambios de volumen y tipo de demanda. Sin embargo, esta fase no debe ser abordada hasta que se haya conseguido un nivel adecuado de mejoras en las actividades manuales, y ello en base a las siguientes razones (O'Grady, 1992, página 78):

- Las mejoras en el trabajo manual no necesitan interrumpir el funcionamiento de la empresa.
- El coste de mejorar el trabajo manual es normalmente bajo en comparación con las inversiones en automatización.
- Cuando se hacen cambios en los trabajos manuales es más fácil volver atrás si no son satisfactorios. Esto es casi imposible en las inversiones en automatización.
- Las mejoras de la maquinaria fracasan a menudo si antes no se han llevado a cabo mejoras en las operaciones manuales, ya que una ejecución inadecuada de estas últimas puede originar un mal funcionamiento de la mejor de las máquinas (items defectuosos, averías, etc.).

Como hemos comentado anteriormente, todos estos incrementos de productividad deben ser buscados, manteniendo a la vez un gran respeto por la dimensión humana de la empresa. Para ello, nada mejor que hacer partícipes a las personas en el proceso de generación de mejoras, estableciendo unos buenos canales de comunicación que permitan atender efectivamente sus sugerencias y haciéndoles comprender que cualquier proceso de mejora emprendido no es más que un medio para enriquecer su trabajo, eliminando los aspectos inútiles y perjudiciales del mismo. De esa forma subirá la moral de los trabajadores y empleados y aumentará su nivel de identificación con la empresa. Este proceso de participa-

ción del personal de las empresas japonesas suele realizarse a través de pequeños grupos de actividades autodirigidas, como los círculos de calidad (ver también Capítulo 12, Apartado 12.3), y el establecimiento de un plan de sugerencias plenamente operativo. Estudiaremos a continuación cada uno de estos aspectos.

7.4.1. Plan de sugerencias

Este plan es un método de dirección que permite aprovechar los talentos y habilidades de los empleados, situando en los talleres buzones en los que éstos depositan sus ideas y sugerencias relacionadas con la mejora del trabajo (Takayanagi, 1989*b*, pág.75). Estas sugerencias, cuya generación puede estar más o menos dirigida por los superiores, son evaluadas con la participación de personal experto, implantándose rápidamente aquellas que se consideran viables y que, por tanto, pueden reportar beneficios a la empresa. La firma recompensará, monetaria y honoríficamente, a la persona que la propuso. Aunque su nacimiento se sitúa a principios de siglo y en empresas occidentales, se puede afirmar que los modernos planes de sugerencias empezaron tras la Segunda Guerra Mundial, cuando los japoneses los incorporaron a sus empresas para modernizar los procesos de dirección. En Japón estos planes de sugerencias no son empleados para *hacer creer al trabajador que participa*, o como meros apéndices de la gestión de personal, sino que son utilizados realmente para mejorar la calidad de los procesos y de los productos. Una prueba de ello es el gran número de propuestas realizado por los trabajadores de las empresas japonesas y aceptado por éstas, con sus consecuentes efectos beneficiosos desde un punto de vista económico (ver Tabla 7.4). Concretamente, en la empresa Toyota las iniciativas de los empleados subieron de 49.000 en 1970 a 859.000 en 1980, alcanzando un promedio por trabajador de más de 10 planes de mejora propuestos; se adoptaron más del 90 por 100 de las iniciativas mencionadas, pagando la empresa, aproximadamente, 415 millones de yens en premios.

Por último queremos recordar que, aunque el aspecto formal de recogida de sugerencias puede no diferir mucho con el de una empresa occidental, la gran diferencia a favor de las empresas japonesas radica en la importancia que aquéllas reciben por parte de la dirección de la compañía y en su proceso de evaluación.

Tabla 7.4. El éxito de los planes de sugerencias en las empresas japonesas (Takayanagi, 1989*b*, pág. 76)

Compañía/Producto	Número (miles)	Efectos económicos (millones de yens)
Kubota Irou Works (tubería y maquinaria)	110	90
Mazda (automóviles)	910	2.500
Nippon Denso (piezas para automóviles)	310	170 o más
Sanyo Electric (equipos electrónicos)	170	310 o más
Sony Corporation (equipos electrónicos)	30	400-500
Nippon Gakki (instrumentos musicales)	180	—
Tokyo Gas (gas)	20	500
Fuji Xerox (máquinas reproductoras)	46	300
Sapporo Beer (cervezas/refrescos)	0,8	140 o más
Ajinomoto (alimentación)	1,8	230
Sumitomo Rubber (caucho)	350	2.500 o más

7.4.2. Círculos de calidad

Por la clara conexión que mantienen en la filosofía «Justo a tiempo», la calidad de los productos con la calidad y mejora de los procesos de producción, los círculos de calidad, nacidos en un principio para el control de la misma, se han convertido en la mejor arma de las empresas japonesas para mejorar los procesos productivos. Actualmente, estos pequeños grupos, formados por 5-12 trabajadores, no sólo tratan temas de calidad del producto, sino también de eficiencia, distribución en planta, mantenimiento, reducción de costes, seguridad, etc., convirtiéndolos, por tanto, en elemento clave en cualquier proceso de fomento de la productividad a través del aprovechamiento de las ideas de los trabajadores. No es extraño, pues, que algunos autores se refieran a ellos como **Círculos de Productividad**.

Aunque la participación en los círculos de calidad es voluntaria, la presión ejercida por los trabajadores japoneses para formar parte de los mismos es alta, pudiendo oscilar aquélla en torno al 90 por 100 de los empleados. Su organización y estructura interna suele establecerse de forma que refuerce la cadena normal de mando y no interfiera con ella, por lo que el líder del círculo suele ser un mando de la estructura formal. En cuanto a su funcionamiento, varía de una empresa a otra; mientras que en algunas suelen reunirse una o dos horas los fines de semana, en otras las reuniones se realizan en horas de trabajo retribuidas (incluso si la reunión se prolonga fuera del horario laboral los componentes del círculo cobran horas extraordinarias). En general, los temas a discutir son elegidos por el propio círculo, aunque suelen tratarse aquellos que actualmente interesan a la dirección en áreas de problemas específicos. Discuten los problemas de sus puestos de trabajo, la idoneidad de las tasas y métodos de producción y formas de mejorar las técnicas. Cuando un miembro sugiere una idea para mejorar un puesto de trabajo, los componentes del círculo discuten su utilidad y deciden si la idea puede adoptarse. Así, los métodos de trabajo no vienen dictados por los superiores, sino que surgen de un acuerdo entre los miembros del grupo.

Otra función importante de los círculos de calidad es la formación de los trabajadores: por una parte, cada uno de sus miembros es formado convenientemente en aspectos técnicos de control de calidad y de mejora de procesos, posibilitando así que puedan proponer las mejoras oportunas; por otra, los obreros cualificados que hayan aprendido una nueva técnica se la enseñan al resto de sus compañeros, con lo cual el círculo de calidad se convierte en un elemento fundamental para la formación profesional de los trabajadores.

El proceso de maduración de un círculo de calidad puede ser largo hasta que dé sus primeros resultados positivos, por lo que necesita de una cuidadosa atención y formación de sus miembros. En base a ello, la evaluación de sus actividades apenas se realiza en función del importe de las mejoras, sino más bien en base a otros criterios como: lo positivo de su funcionamiento, lo acertadamente que se persiguen los objetivos o el grado de participación de sus miembros (Monden, 1987, pág. 150).

En resumen, tanto con el plan de sugerencias como con los círculos de calidad se consiguen las siguientes ventajas (J. A. D. Machuca y P. Luna, 1990, pág. 513):

- Fomentar grupos de estudio en los que participen mandos y obreros.
- Dinamizar las capacidades individuales, muchas veces ignoradas o escasamente estimuladas.

— Aplicar los resultados obtenidos al conjunto de la empresa para conseguir una dirección más eficiente y un mejor entorno de trabajo.
— Enriquecer la personalidad de los obreros y su integración y participación en el grupo.
— Contribuir a la formación permanente de los trabajadores

7.5. EL CONTROL AUTONOMO DE DEFECTOS O JIDOKA

De la definición de la filosofía «Justo a tiempo» ya se desprende que, desde una óptica de servicio al cliente, la calidad es un fin en sí misma dentro del JIT (recordar el Apartado 6.2). Por otra parte, desde un punto de vista de funcionamiento interno, la calidad es un elemento clave para asegurar el éxito de una fabricación *pull* que pretende trabajar con cero inventarios, ya que la aparición de pro ductos defectuosos impediría la entrega «Justo a tiempo», ocasionaría una serie de despilfarros no admisibles bajo esta filosofía y no permitiría un flujo regular y sincronizado de la producción. En este apartado intentaremos justificar el lema bajo el cual afrontan el control de calidad las empresas japonesas: *«la calidad no se inspecciona, sino que se fabrica»*; dichas firmas *están más preocupadas por hacer las cosas bien que por controlar posteriormente* cómo se ha hecho. Además explicaremos qué mecanismos utilizan para ello. Sin embargo, queremos aclarar que sólo nos referiremos al control de la calidad en los procesos de fabricación, aspecto que se encuentra englobado dentro de un concepto más amplio de control global de la calidad, del que participan los proveedores y que será comentado en el Apartado 7.7 y en el Capítulo 12.

El control de calidad empezó a desarrollarse en Japón, después de la Segunda Guerra Mundial, a través de los métodos de control estadístico, sobre todo como resultado de los cursos impartidos por el doctor W. E. Deming. Sin embargo, en el contexto de una filosofía que busca una calidad 100 por 100 y una eliminación de todo tipo de despilfarro y actividades que no incorporen valor añadido al producto, algunos métodos basados en la utilización de inspectores de calidad, de técnicas de muestreo y fijación de un límite aceptable de defectos presentan claros inconvenientes (Shingo, 1990*a*):

- Las actividades de los inspectores de calidad están fuera de las labores de producción, por lo que sus tareas no incorporan valor añadido al producto.
- Las técnicas de control estadístico que realizan una inspección *a posteriori*, eliminando aquellos productos que no reúnen las condiciones de calidad exigidas, descubren los defectos, pero no son las más efectivas para *reducirlos* debido a las siguientes razones:

  — Al no ser una inspección en la fuente, no detectan rápida y directamente la causa que origina los defectos.
  — Su proceso de *feed-back* es lento. Normalmente los resultados de la inspección no se revisan hasta una próxima reunión de los responsables de calidad, tiempo durante el cual pueden estar produciéndose nuevos defectos.
  — Es normal que en las inspecciones por muestreo se revisen las primeras y las últimas piezas de un lote; si éstas son defectuosas se inspecciona el lote al 100 por 100, pero si son buenas el lote se da por aceptado. Ello olvida la posibilidad de ocurrencia de defectos ocasionales que pueden haber surgido en algún otro momento de la fabricación del lote y que, por tanto, no serán detectados.

En resumen, aunque el muestreo puede ser una forma racional de procurar la eficiencia de los métodos de inspección, no asegura la calidad en sí misma. En su contexto, llega a tener sentido la fijación de un límite aceptable de calidad, pero no en un contexto de cero defectos. En Japón se trabaja bajo la idea de que cada cliente compra un solo producto y que, si este producto es defectuoso, el cliente perderá la fe en la empresa, por lo que para las firmas japonesas no es aceptable ningún nivel de defectos.

Por las razones anteriores, las empresas que trabajaban con el enfoque JIT pronto se dedicaron a buscar métodos que, de forma cómoda y rápida, asegurasen una inspección del 100 por 100 de las piezas procesadas. Los defectos debían ser detectados en el mismo momento y lugar de su ocurrencia y deberían establecerse los mecanismos de corrección necesarios para que no volviesen a producirse.

No cabe duda de que la autoinspección, donde el propio trabajador inspecciona cada una de las piezas realizadas, justo en el momento en que la realiza, es el método que asegura una retroalimentación más rápida. En este sentido, podía ser la técnica más adecuada para los fines perseguidos; sin embargo, es verdad que presenta una serie de inconvenientes, además de la necesidad de formación y motivación del trabajador: éste puede realizar juicios de compromiso y aceptar items que deberían rechazarse, o bien cometer errores de inspección no intencionados (Shingo, 1990*a*, pág. 57). Para evitar estos problemas, el JIT desarrolla para sus controles de calidad métodos de autoinspección en la fuente donde el trabajador está auxiliado por mecanismos que detectan y previenen automáticamente los defectos. Para referirse a este enfoque del control de la calidad se utiliza la denominación japonesa **Ninben-no-aru Jidoka** que significa literalmente **«automatización con mente humana»** y a la que nos referiremos de forma abreviada como **Jidoka**. Este concepto, que se aplica tanto a labores mecanizadas como manuales, nace como una técnica para detectar y corregir defectos de la producción utilizando mecanismos y procedimientos que avisan de cualquier anomalía en el funcionamiento o producto defectuoso, llegando a detener la línea de producción o la máquina concreta en caso necesario. En el siguiente ejemplo podemos observar un caso práctico de Jidoka:

EJEMPLO 7.4. Un caso sencillo de Jidoka (Shingo, 1990a, pág. 63)

En un determinado proceso de la planta de Arawaka Sahtai, fabricantes de carrocería de coches, se adhieren accesorios metálicos a los asientos de los ocho modelos de coches distintos que se fabrican de forma mezclada. Los trabajadores seguían las instrucciones del Kanban que acompañaba al material y adherían los accesorios adecuados a cada caso. Sin embargo, se observó que era frecuente la incorporación a un determinado coche de accesorios erróneos. Para solucionar el problema se utilizó el siguiente sistema:

Se adhirió al Kanban de cada modelo un pequeño disco metálico. Cuando el trabajador despega el Kanban del asiento del coche a procesar, lo introduce en un recipiente que a base de conmutadores eléctricos abre sólo la caja que contiene los accesorios adecuados para el modelo de asiento en cuestión. Como las cajas permanecen cerradas, a menos que sean activadas por el Kanban apropiado, es imposible que accidentalmente se tomen accesorios de la caja equivocada.

Este método eliminó completamente los defectos y permitió a los trabajadores no concentrarse en la selección de los accesorios, sino en el trabajo en sí mismo.

Estos dispositivos de control, que, situados en los utensilios e instrumentos, impiden el trabajo defectuoso y permiten subsanar o prevenir los posibles fallos de control humano, son denominados «Baka-yoke» (a prueba de tontos) o «Poka-yoke» (a prueba de errores). Constituyen un método eficaz para asegurar una inspección autónoma en la fuente del 100 por 100 de la producción y, por tanto, conseguir la meta de cero defectos.

Ahora bien, dado que lo que se busca, ante todo, es un efecto preventivo de la ocurrencia de cualquier defecto, no se espera a que éstos aparezcan y *se articulan métodos para detener la línea, incluso de forma voluntaria, por el propio trabajador*, si se observa cualquier anormalidad (un producto defectuoso que llega del proceso anterior) o no se es capaz de realizar las operaciones en el tiempo o en la forma establecida por la ruta estándar de operaciones (por ejemplo, situando alfombrillas en el suelo que detienen automáticamente la línea al ser pisadas por un trabajador que supera su lugar de trabajo para acabar una labor fuera de tiempo). Con ello se revisará automáticamente esta ruta de operaciones, evitando futuros problemas. Lógicamente, este método de detener la línea ante cualquier anormalidad disminuirá la eficiencia a corto plazo, pero, dado que cuando se comience a fabricar de nuevo el problema habrá quedado solucionado y con pocas posibilidades de repetirse, esta misma eficiencia crecerá a niveles superiores a los anteriores (O'Grady, 1992, pág. 38).

Además de los métodos anteriores, y como sistema de apoyo, existe una serie de controles visuales que ayuda a comprobar la marcha de la producción, y si ésta es acorde con el funcionamiento previsto. Por ejemplo, para detectar un problema en cualquier proceso, una señal eléctrica luminosa (el andón) se sitúa en un lugar elevado de la planta y, con sus distintos colores, indica si existe algún problema en alguna parte de la línea (roja = avería, verde = falta de materiales, azul = unidad defectuosa, etc.). Con ello se facilita que el responsable sepa inmediatamente de la existencia del problema e inicie las acciones correctivas necesarias.

En resumen, el Jidoka permite a la empresa conseguir las siguientes ventajas (J. A. D. Machuca y P. Luna, 1990, pág. 514):

- Garantizar la calidad de los componentes y productos terminados a través de una inspección del 100 por 100, cómoda y eficaz.
- Reducir los ciclos de fabricación, ya que, al integrarse la inspección en la línea de producción, no son necesarios los tiempos de transporte para llevar las piezas a un centro de verificación.
- Pueden suprimirse los inventarios de seguridad destinados a solventar problemas de calidad.
- Reducir el número de inspectores de calidad y, con ello, los costes de personal.
- Aumentar la productividad al eliminar tareas que no aportan valor añadido.
- Evitar los típicos conflictos entre los inspectores de calidad y los trabajadores, ya que todo el personal siente como suya la lucha contra los defectos.

Por último, queremos señalar que la aplicación de este enfoque sobre la calidad, que puede ser desarrollado fácilmente en cualquier tipo de empresa, permite crear en las mismas un alto nivel de estabilidad, disminuyendo drásticamente la aleatoriedad sobre la calidad de los productos. Sin embargo, para completar el efecto preventivo de las mismas, es necesario atacar de igual manera otras fuentes de riesgo. Unas, como las averías en los equipos, son de índole interno; otras proceden del exterior, como los problemas con los suministros o con las ventas. Lo primero puede subsanarse a través de una adecuado mantenimiento productivo (Apartado 7.6) y lo segundo mejorando las relaciones con proveedores y clientes (Apartado 7.7).

7.6. EL MANTENIMIENTO PRODUCTIVO TOTAL

En una concepción clásica de la fabricación, donde se utilizan inventarios de seguridad para eliminar inestabilidades y problemas imprevistos, la avería de una máquina puede ser solucionada con relativa facilidad antes de que provoque grandes inconvenientes al resto del proceso. En estos casos, la gran preocupación es la de obtener el máximo rendimiento de la máquina durante su etapa de funcionamiento y procurar que la avería llegue lo más tarde posible. Sin embargo, en un entorno JIT, donde se pretende trabajar con el mínimo nivel de inventarios, cualquier avería de una máquina, además de influir en una disminución de su grado de utilización y eficiencia, dará lugar a que, en poco tiempo, la que le sigue en el proceso productivo acabe con las existencias de sus *inputs* y tenga, a su vez, que pararse. En definitiva, en un sistema que pretenda trabajar con cero inventarios las averías no sólo afectan a la máquina que la sufre, sino que sus efectos pueden extenderse al resto del proceso productivo, provocando una pérdida de eficiencia global del sistema y un aumento de los plazos de fabricación. Son este tipo de argumentaciones las que justifican que un buen proceso de mantenimiento de las máquinas sea una pieza fundamental para el pleno desarrollo y el éxito de la fabricación «Justo a tiempo».

El desarrollo de estos aspectos en las industrias japonesas ha desembocado en una cierta superación de los conceptos clásicos de mantenimiento, en los cuales se emprendían acciones correctoras cuando ya se había producido una avería o, en el mejor de los casos, se intentaba adoptar medidas preventivas con la realización de ciertas revisiones periódicas (mantenimiento preventivo). En ambos casos, siempre implicaban una clara separación entre los operarios dedicados a tareas productivas y los especializados en labores de mantenimiento, que incluso podían ser externos a la empresa. En Japón, de nuevo se cuenta con los trabajadores para intentar aumentar la eficiencia global del sistema, implicándolos en las tareas de mantenimiento de las máquinas con las que trabajan. De esta forma, nace el concepto de **Mantenimiento Productivo Total (MPT)**, donde todos los trabajadores participan en las labores de prevención, detección y corrección de las anomalías de diseño o funcionamiento de las máquinas. En un programa de mantenimiento productivo total cada trabajador es responsable de desarrollar sobre su propio puesto de trabajo actividades como las siguientes (Seizo Ikuta, 1989, página 99):

- Limpiar todo el polvo y basura, lubricar y ajustar las piezas, detectar y reparar defectos de funcionamiento.
- Adoptar medidas contra las fuentes de averías, previendo las causas de polvo, basura y desajustes.
- Proponer sistemas estándar para realizar las actividades de mantenimiento en el menor tiempo posible.
- Detectar y reparar defectos menores del equipo a través de chequeos globales.

— Mantener su puesto de trabajo con el orden apropiado, eliminando los objetos innecesarios y disponiendo los necesarios de la forma más adecuada posible.

Delegar estos aspectos de mantenimiento a los operarios de las máquinas tiene dos ventajas fundamentales (O'Grady, 1992, pág. 73). En primer lugar, los operarios son probablemente los que más saben sobre el funcionamiento de sus máquinas y, por tanto, las personas más adecuadas para detectar ruidos, desgastes o vibraciones no habituales. En segundo lugar, se da a los operarios una cierta sensación de propiedad sobre aquéllas, por lo que se sienten más responsables a la hora de evitar las posibles averías.

En cuanto al momento adecuado para realizar las tareas de MPT, éste puede depender de las circunstancias, pero siempre es conveniente integrarlo dentro de los programas de producción. Una de las mejores formas, si ello es posible, es desarrollar este tipo de actividades entre turnos de trabajo (las empresas japonesas trabajan normalmente con uno o dos turnos, quedándoles así tiempo entre turnos para labores de mantenimiento y realización de horas extras).

Entre otras, el MPT puede contribuir a conseguir las siguientes ventajas para las empresas que lo apliquen:

— Reducciones significativas del número de averías imprevistas.
— Aumento del grado de utilización de las máquinas y de su productividad.
— Decrementos del índice de defectos y de las reclamaciones de los clientes.
— Disminución de los costes de mantenimiento.
— Disminución del número de accidentes laborales.
— Aumento del grado de satisfacción de los trabajadores.
— Etcétera.

Por último, compartimos la opinión (Hall, 1988, pág. 146) de que la implantación de un sistema de MPT es uno de los pasos fundamentales en el proceso de maduración hacia una producción sin stocks. Sin un programa que prevenga y evite las averías, cualquier sistema que pretenda una producción sin stocks fallará al no eliminar una de las principales fuentes de problemas.

7.7. RELACIONES CON LOS PROVEEDORES Y LOS CLIENTES

Igual que al caer una piedra en las tranquilas aguas de un lago se producen ondas que, poco a poco, se extienden de forma concéntrica por la superficie, la implantación de la filosofía «Justo a tiempo» en una gran empresa debe provocar un fenómeno similar de expansión en sus proveedores y clientes. Al menos así debería ser si se desea conseguir todo el beneficio potencial que el JIT promete. En efecto, al igual que deben realizarse importantes transformaciones internas en el proceso productivo y en el comportamiento de los trabajadores, también se necesitará conseguir cambios sustanciales en la relación con los proveedores y los clientes para conseguir la máxima eficiencia de las operaciones. Ello permitirá ampliar el alcance de la reducción de costes y dar mayor impulso a la mejora de la calidad; por ejemplo, si mejora la de los componentes adquiridos a los proveedores, disminuiremos nuestros costes de inspección y reprocesamiento y aumentaremos la calidad de nuestro producto final.

Hay que tener en cuenta que esta expansión del JIT a la red de proveedores es un proceso delicado, que debe ser efectuada de manera adecuada. Su final será la

concepción de un sistema de relaciones mutuas en las que el proveedor llegará a ser considerado como el inicio del proceso productivo de la empresa cliente y donde la lealtad y la confianza serán elementos fundamentales. A pesar de ello no siempre se ha hecho así, por lo que ha creado recelos importantes (ver Monden, 1987, pág. 52). En esencia, los proveedores deberán realizar entregas frecuentes de pequeñas cantidades de componentes con calidad asegurada. Por ejemplo, un determinado proveedor puede hacer tres entregas diarias y, en cada una de ellas, retirará los contenedores y Kanbans de proveedores correspondientes a la próxima entrega a realizar (ver Capítulo 6, Apartado 6.4 y Cuadro 7.4).

En un entorno JIT, la red de proveedores ideal debería estar formada por un reducido número de ellos, ubicado relativamente cerca de la empresa cliente y con contratos de suministro a largo plazo. Lógicamente, esto debe estar acompañado de un elevado grado de seguridad en los tiempos de suministro y de una alta calidad, además de un compromiso de entregas frecuentes de mercancías. Analizaremos a continuación cada una de las caracteríticas mencionadas y el porqué de su necesidad (ver O'Grady, 1992, Capítulo 8).

7.7.1. Pequeño número de proveedores

En el «Justo a tiempo» se intenta agrupar los suministros en pocos proveedores, cada uno de los cuales elaborará varios tipos de artículos pertenecientes a una misma familia. Con ello, la producción de cada proveedor individual puede alcanzar volúmenes importantes que justifiquen inversiones para mejorar su proceso productivo. Además se podría, pues, acceder a ciertas economías de escala al reducir sus costes fijos unitarios y con ello el precio de venta a la empresa cliente si éste se negocia en base al coste de fabricación. A este *efecto positivo*, la empresa cliente podrá sumar el obtenido a través de la *simplificación de la gestión de compras* al reducir el número de proveedores.

El único *riesgo* que conlleva la mencionada concentración es el aumento de *dependencia* de las empresas proveedoras (imaginemos, por ejemplo, los graves problemas que ocasionaría una hipotética interrupción de los suministros). Sin embargo, este riesgo quedará reducido si, por una parte, el proceso de selección de proveedores se realiza de forma adecuada (por ejemplo, eligiendo sólo aquellos financieramente sólidos y con una Dirección adecuada) y, por otra, la empresa cliente les presta *suficiente apoyo y asistencia técnica* para estabilizar y mejorar sus procesos productivos, mostrándoles el camino para incrementar su calidad, fiabilidad y flexibilidad. En este sentido, Harley Davidson forma a sus proveedores en el «Justo a tiempo» mediante sesiones mensuales y les ayuda en la puesta en práctica de técnicas como el SMED. Citroën ayuda igualmente a sus proveedores en su marcha hacia el cero stock y las empresas japonesas envían gratuitamente ingenieros a sus subcontratistas coreanos de fundición para ayudarles a poner en práctica una organización eficaz de tipo «Justo a tiempo». Toyota tiene habitualmente en sus plantas a varios centenares de responsables de las empresas proveedoras entrenándose en su modo de fabricación. Este proceso de reducción de proveedores ha llevado a empresas como Xerox a pasar de 5.000 a 300, a Harley Davidson de 350 a 170, a Control Data de 900 a 250, etc. (V. Laboucheix, 1992, pág. 171).

Por último, comentaremos que si este proceso es bien conducido, desarrollado lentamente y con la cautela debida, ayudará a conseguir precisamente las *ventajas* que se pretenden con la diversificación de las fuentes de suministros, es

decir, *reducción de precios y seguridad en los suministros.* Sin embargo, el proceso puede resultar desastroso si no se elige bien a los proveedores o si no se les presta la debida atención y asistencia en el nuevo destino común.

7.7.2. Contratos de suministro a largo plazo

Bajo el JIT se estimula la firma de contratos a largo plazo con los suministradores, ya que, si a la estabilidad en el tiempo que proporciona este tipo de contrato se le suma el importante volumen de pedidos como consecuencia de la agrupación de suministros, la empresa se convertirá en un cliente importante para el proveedor, que intentará *satisfacer debidamente sus promesas de entrega* (frecuentemente a expensas de contratos a corto plazo con otros clientes). Además, este tipo de contratos proporciona la suficiente estabilidad al proveedor como para animarle a emprender procesos de mejora, y *facilita que en la negociación de las condiciones puedan incluirse no sólo aspectos de precios, sino de calidad y condiciones de entrega.* De nuevo hay que insistir en la prudencia a la hora de cambiar a este tipo de contratos, pues un proceso apresurado puede ocasionar graves perjuicios a la empresa.

7.7.3. Cercanía geográfica del proveedor

Cualquier disminución de la distancia entre la empresa cliente y la proveedora *facilita las entregas más frecuentes de lotes más pequeños.* A esta ventaja, que es acorde con la operativa del JIT, habrá que añadir que, de esta forma, *cualquier problema* (por ejemplo de calidad) que hiciese no aceptar el envío, *sería descubierto antes y, alertando al proveedor, afectaría a menor número de unidades,* con lo que se evitarían problemas y despilfarros tanto para el proveedor como para el cliente. A la vez que se disminuye la distancia física y, por tanto, el tiempo de transporte necesario para recibir un determinado pedido, podrá disminuirse su tiempo de suministro. Cualquier reducción del tiempo de transporte significará una reducción del horizonte de planificación, con la eliminación de la incertidumbre que ello conlleva y las ventajas que reporta a la hora de adecuarse a los posibles cambios de la demanda. En todo caso, el tipo de relaciones mantenido con los proveedores bajo la filosofía «Justo a tiempo», con contratos a largo plazo y cifras importantes de negocio, podría motivarlos a situar su factoría cerca de la empresa cliente. Dado que las entregas frecuentes de mercancías que se exigen bajo la filosofía JIT puede encarecer en sí misma el coste de transporte global, pueden adoptarse soluciones alternativas a las entregas individuales de cada proveedor. En el Cuadro 7.3 se recogen algunas de estas soluciones.

Por último, en la relación con los proveedores, no todo deben ser exigencias, sino que también la empresa cliente debe cumplir una serie de requisitos para que el sistema conduzca a todos los participantes a un aumento de la eficiencia de sus operaciones. Una gran empresa no debería intentar imponer a sus proveedores entregas «Justo a tiempo» sin antes haber realizado en sus propias instalaciones las mejoras oportunas que le permitan un desarrollo aceptable de este tipo de fabricación. En particular, la empresa cliente debe ser capaz de especificar a los proveedores, con cierto grado de exactitud, las necesidades futuras de suministros (por ejemplo, las necesidades de un mes podrían ser comunicadas con dos o tres

semanas de antelación. Ahora bien, si éstas previsiones no se correspondiesen posteriormente con los pedidos diarios, el sistema podría convertirse en algo diabólico para la fábrica del proveedor). Además, la firma en cuestión deberá conseguir trabajar con un programa de producción nivelado, lo cual facilitará sobremanera la propia programación de la empresa proveedora. Pedidos muy fluctuantes podrían convertirse en una presión insoportable para el proveedor.

Cuadro 7.3. Algunas soluciones alternativas para las entregas de los proveedores

Hasta ahora viene siendo normal en la relación con los proveedores la utilización de un sistema radial en el que cada uno de ellos hace sus entregas de forma independiente (ver Figura 7.13). Bajo la filosofía «Justo a tiempo» se intenta evitar este tipo de relación, ya que las frecuentes entregas requeridas elevarían sustancialmente el coste del transporte total. Es más, bajo esta filosofía, con la intención de aumentar la seguridad en la fecha de entrega, se propone que sea la empresa cliente la que asuma la responsabilidad del transporte de los pedidos realizados a los proveedores. Una solución alternativa al sistema radial de entregas lo puede constituir la creación de un sistema eslabonado donde distintos proveedores, cercanos entre ellos, se pongan de acuerdo para entregar de forma conjunta sus mercancías (ver Figura 7.14). Los proveedores cuyo volumen de entregas así lo justifique pueden seguir realizando entregas individuales. Un sistema parecido es el que utiliza la empresa New United Motor Manufacturing, de California, la cual, mediante la contratación de una empresa de transporte radicada en Chicago, retira diariamente un camión de distintas piezas de sus proveedores del Medio Oeste (más de 3.000 kilómetros de distancia) expidiéndolo diariamente a California (Vollmann y otros, 1991, pág. 323). Ver también un caso español en el Cuadro 7.5.

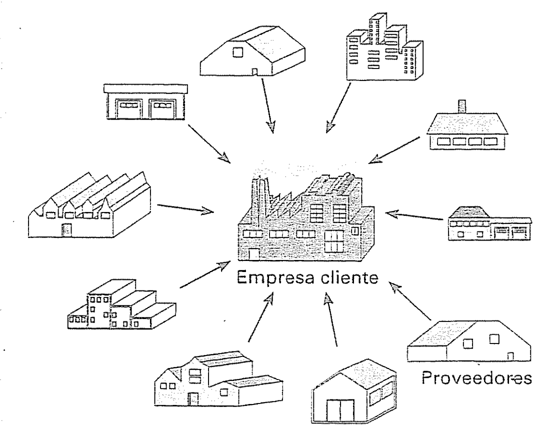


Figura 7.13. Un sistema radial de entregas.

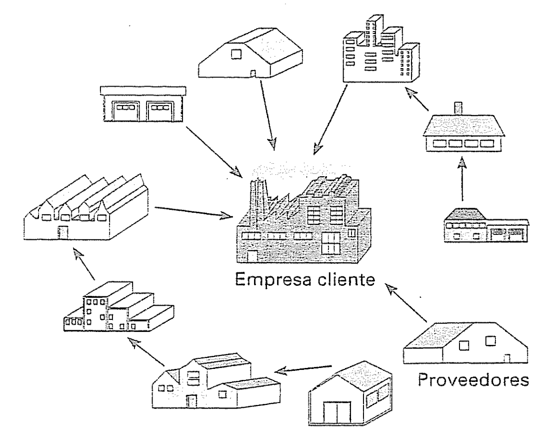


Figura 7.14. Sistema eslabonado de entregas.

En cuanto a la relación de la empresa que promueva la implantación del JIT con sus clientes, ésta tendrá que cambiar, de alguna forma, los razonamientos de sus compradores, para la mayoría de los cuales el precio de compra habrá sido frecuentemente el único criterio de eficacia. Será preciso hacerles razonar en términos de las características completas de la compra, es decir, en función de la calidad, coste, plazo y cantidades a entregar (V. Laboucheix, 1992, pág. 169). Para finalizar con este apartado recogemos en el Cuadro 7.4 el sistema utilizado por la empresa Toyota en la relación con sus proveedores.

Cuadro 7.4. El sistema utilizado por Toyota en la relación con sus proveedores

La empresa Toyota retira directamente los artículos de las fábricas de sus proveedores, utilizando para su relación con ellos el mismo sistema Kanban que emplea en el interior de sus fábricas. La retirada de piezas la realiza con un sistema de período constante (ver Capítulo 13). El procedimiento utilizado es el siguiente:

- A mediados del mes anterior, Toyota suministra información a sus proveedores sobre los pedidos previstos para el siguiente mes. Sin embargo, ello no constituye una orden de pedido firme, sino que sólo sirve al proveedor para planificar sus necesidades futuras de capacidad y nivelar programas. Los pedidos reales son realizados mediante los correspondientes kanbans de proveedores que diariamente llegan a las instalaciones de estos últimos.

Para el traslado de los materiales, Toyota utiliza el que denomina sistema de las tres furgonetas (Monden, 1987): supondremos que se realizan dos pedidos diarios: a las 8 de la mañana y a las 9 de la noche. Cada día, a las 8 de la mañana, llegará a la fábrica del proveedor un operario de Toyota con una furgoneta cargada con contenedores vacíos y sus respectivos Kanbans. Estos constituyen el nuevo pedido que será recogido a las 9 de la noche. Cuando el trabajador llega al almacén del proveedor, deja la furgoneta en él y recoge, inmediatamente, otra ya cargada con piezas que se corresponderán con el pedido realizado a las 9 de la noche del día anterior, dirigiéndose de nuevo a Toyota. En esta empresa estará siendo cargada de contenedores vacíos la tercera furgoneta, con la que se realizará el siguiente pedido (ver Figura 7.15).

Con esta solución adoptada por Toyota se reducen los tiempos de transportes y, además, se elimina la necesidad de mantener inventarios en la planta, lo cual compensa cualquier incremento de coste que se produjese (en todo caso, este incremento es relativo, debido a la mayor vida útil de cada furgoneta y el ahorro de coste de personal en las labores de carga y descarga).

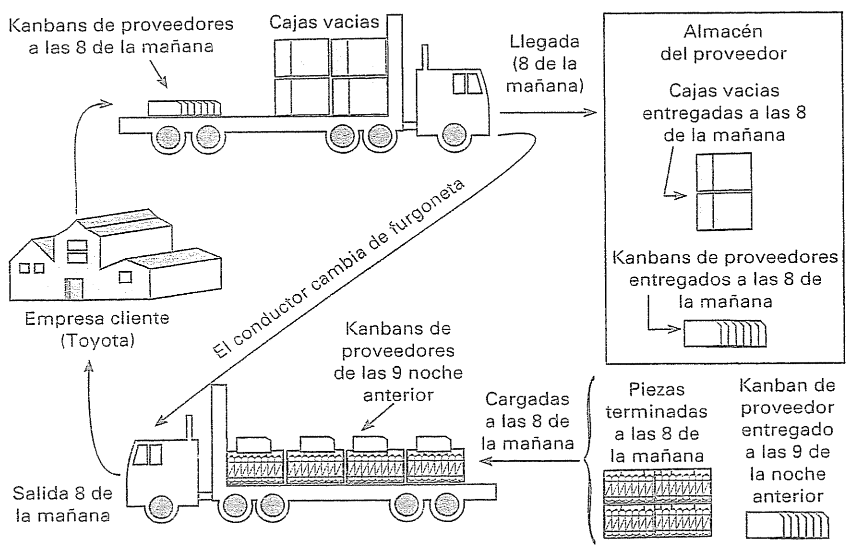


Figura 7.15. El sistema de las tres furgonetas.

7.8. APLICACION DE LA FILOSOFIA «JUSTO A TIEMPO» A LAS EMPRESAS DE SERVICIOS [5]

Las empresas de servicios comparten con las dedicadas a la transformación la característica fundamental de añadir valor, a través de sus procesos, a un *input* básico, creando un producto o servicio final en el cual el consumidor encontrará una determinada funcionalidad o utilidad. Es este razonamiento, unido al hecho de que el JIT centre gran parte de sus esfuerzos en la mejora de cualquier tipo de proceso, lo que justifica que las enseñanzas derivadas de la filosofía «Justo a tiempo» puedan ser aplicadas, con garantía de éxito, en las empresas de servicios. Por ejemplo, también en este tipo de empresas habrá que eliminar todos aquellos procesos que no aporten valor añadido al servicio final y que, por tanto, puedan ser considerados como un claro despilfarro.

Si realizamos un breve repaso a los *principios básicos del JIT*, comprenderemos rápidamente la gran utilidad que éstos pueden llegar a tener para una empresa de servicios:

- **Sincronización y equilibrio:** La sincronización y el equilibrio que el JIT propugna para las operaciones de la empresa, de forma que las operaciones y las entregas al cliente se realicen en los momentos precisos, encuentran una plena justificación en las empresas de servicios, donde existe mucha más probabilidad de que el cliente no acepte un retraso si encuentra otras alternativas.
- **Flexibilidad:** La flexibilidad que el JIT exige a las empresas productivas tiene mayor relevancia, si cabe, en las empresas de servicios, las cuales deben ser especialmente flexibles, ya que, a veces, será necesario desarrollar el servicio requerido de forma instantánea y totalmente ajustado a las necesidades o deseos de un cliente particular.
- **El respeto por el factor humano de la empresa:** La filosofía «Justo a tiempo» considera a las personas que trabajan para la organización como el mayor capital de la empresa, y las anima para que aprovechen plenamente sus capacidades intelectuales. Dicho valor toma mayor protagonismo en las empresas de servicios, donde una parte importante de la calidad y el valor que se otorgue al servicio solicitado dependerá de la pericia y la habilidad con las que el personal haya desarrollado su trabajo. Es más, la responsabilidad sobre los procesos de producción también será mayor en la empresa de servicios, ya que cualquier fallo en la realización del trabajo será percibido directamente por el cliente, poniendo en peligro la continuidad del mismo.
- **Proceso de mejora continua:** También en los servicios es necesario un enfoque de mejora continua de los procesos y de los servicios ofrecidos si la empresa no desea ver peligrar su presencia en el mercado. En este sentido, muchas empresas están utilizando grupos de trabajadores para mejorar la calidad y el valor de los servicios ofrecidos. Honeywell ha extendido sus círculos de calidad de fabricación a sus operaciones de servicios y British Airways los utiliza como parte fundamental en su estrategia para implantar nuevas prácticas de servicios.
- **Atención por la limpieza:** Al igual que en las organizaciones productivas, la limpieza y buena organización de los centros de trabajo influyen decisiva-

[5] Seguiremos en el desarrollo de este apartado el trabajo realizado por Benson (1986) y Aquilano (1991).

mente en el desarrollo de las operaciones y en la calidad de los servicios. Así, compañías de servicios como McDonald's o Disneyland han reconocido que la limpieza en sus operaciones hace que los procesos se desarrollen mejor, las mejoras sean más fáciles de llevar a cabo y, en definitiva, los clientes perciban que están recibiendo un mejor servicio.

- **Simplificación del flujo de operaciones:** Los flujos de procesos en fábricas se centran, generalmente, en el movimiento de los componentes fabricados. En el sector servicios, los flujos pueden incluir información, materiales e incluso a los clientes, por lo que su clarificación y simplificación se convierte en fundamental para el buen desarrollo de las operaciones.
- **Revisión de los equipos y de los procesos tecnológicos:** El mismo cambio que realiza el JIT en las empresas fabriles hacia máquinas más pequeñas, más universales, más rápidas, con procesos más simples y sometidas a un buen mantenimiento preventivo, puede ayudar a las empresas de servicios a reducir el tiempo de sus operaciones y a obtener mayor flexibilidad para desarrollar una línea más amplia de servicios sin reducir su capacidad.
- **Nivelación de la producción:** Las empresas de servicios también empiezan a conseguir cargas de trabajo más uniformes introduciendo sistemas de reservas, servicios complementarios e incentivos por utilizar el servicio en tiempos de menor consumo. McDonald's, por ejemplo, para crear planes de trabajo más uniforme ha empezado a ofrecer un servicio especial de desayunos.
- **Cambios en la distribución en planta:** La creación de células de fabricación dedicadas a la elaboración de una determinada gama de productos está siendo aplicada con éxito en algunas empresas de servicios. Por ejemplo, algunos hospitales, en lugar de conducir al enfermo por todo el edificio para realizarle distintas pruebas y exámenes, están reorganizando estos servicios en grupos de trabajo especializados en ciertos problemas. Empiezan a ser comunes zonas y grupos de personas, que, constituidas en micro-hospitales dentro del edificio general, disponen de todo el material necesario para tratar enfermedades específicas.

En este apartado hemos intentado demostrar que aunque el JIT nace y se desarrolla en empresas fabriles, la racionalidad de sus principios básicos hace posible su aplicación (incluso de alguna de sus técnicas concretas) a las empresas de servicios, como lo demuestra el hecho de que ya muchas de ellas lo están aplicando con éxito. Es más, compartimos la opinión (Aquilano, 1991, pág. 594) de que el JIT puede llegar a convertirse en el enfoque general y comprensivo del que carecen actualmente las empresas de servicios para mejorar sus operaciones, ayudándoles a conseguir servicios de alta calidad y excelente valor, producidos todos ellos con una alta productividad.

7.9. IMPLANTACION DE LA FILOSOFIA «JUSTO A TIEMPO»

El JIT, como sistema de gestión de la producción, encuentra su *campo de aplicación preferente en las configuraciones productivas repetitivas de unidades discretas.* Preferiblemente puede aplicarse ante una demanda estable, con gama de productos/opciones reducida, rutas de fabricación fijas, proceso de fabricación simple y rápido y estructura de productos lo más plana posible (J. A. D. Machuca y P. Luna, 1990, pág. 505). Sin embargo, el hecho de que el escenario anterior sea el ideal para la aplicación completa de la filosofía JIT, no implica que sus distintos

principios o técnicas (eliminación de los despilfarros, calidad máxima, etc.) no sean de aplicación general a cualquier tipo de empresa. De esta forma y a nivel de ejemplo, empresas que se mueven en un ambiente de producción semirrepetitivo, han encontrado una buena forma de gestión y control combinando los sistemas JIT y MRP: utilizan MRP para planificar los materiales por adelantado y JIT para la gestión de talleres (ver Capítulo 9). Este tipo de sistemas que combinan MRP y JIT, llamados SYNCHRO-MRP, se están utilizando en Yamaha Motor Co. (Schroeder, 1992, pág. 549).

En cuanto al proceso de implantación, hoy en día contamos con la experiencia acumulada de muchas empresas que lo han realizado satisfactoriamente. Sin embargo, estas experiencias positivas y la aparente sencillez de sus principios no deben confundirnos, ya que su proceso de implantación necesita de esfuerzos importantes y sostenidos que, si se realizan de forma adecuada, pronto se verán recompensados con resultados positivos, a veces espectaculares.

7.9.1. Fases del proceso de implantación[6]

7.9.1.1. *Fase previa: Educación directiva y creación de un equipo para la implantación*

Esta primera fase es crucial, pues el éxito o fracaso de la aplicación dependerá en gran medida de las decisiones que se adopten en ella. En un primer momento debe existir una compresión profunda de los principios del JIT, de sus posibles beneficios y de los escollos de la implantación, por parte de ciertas personas clave del organigrama de la empresa. Estas actuarán posteriormente como fuerza motriz para que la compañía acepte la filosofía JIT, participando en la **educación preliminar** de los altos cargos de la empresa. Con esta educación preliminar, donde es posible que sea necesario el apoyo de especialistas externos, se pretende informar al resto del personal clave y a la Alta Dirección sobre el JIT. Debe proporcionárseles una visión global y objetiva de la filosofía, de las fases necesarias para ponerla en práctica y de los probables costes y beneficios; del mismo modo, se les hará comprender que poner en práctica el JIT será una verdadera revolución y, por tanto, comportará cambios fundamentales en el funcionamiento de la empresa. En este sentido, Shigeo Shingo (1990a, pág. 271) estima «que constituiría un gran error imitar las características externas del sistema Toyota de producción. El sistema no puede aplicarse con propiedad sin una completa comprensión de los principios en los que se basa. Adicionalmente, es importante embarcarse en su aplicación solamente después de que se haya obtenido una clara comprensión de cómo encajan las técnicas individuales en el cuadro global». Después de la educación preliminar, los altos directivos de la empresa querrán saber con más exactitud cuáles son las ventajas concretas que se espera conseguir con el JIT y cuál su coste de consecución, por lo que será necesario realizar un análisis coste/beneficios. Este análisis no suele ofrecer demasiados problemas, ya que, como se verá más adelante, JIT suele ofrecer muchas ventajas a un coste relativamente bajo. Superado lo anterior, es fundamental conseguir un fuerte compromiso por parte de la dirección de la empresa, ya que, sin él, fallará posiblemente el proceso de implantación. *La dirección debe ser consciente de que la aplicación del JIT va a imponer muchos cambios de actitudes* (por ejemplo, el parar voluntariamente la línea de producción ante cualquier anomalía), *por lo que*

[6] Adoptaremos la denominación y sucesión de las distintas fases de O'Grady (1992).

debe estar dispuesta a admitir estos cambios y, además, a facilitarlos a través de su autoridad, formal y psicológica, al resto de los mandos y personal en general. Sin este alto nivel de compromiso es preferible aplazar la implantación del JIT.

Como último paso de esta fase previa, es necesario *crear un equipo de personas, dinámico y de calidad*, para preparar un *programa realista de implantación*. En las empresas más grandes, este programa debe concentrarse inicialmente en una planta piloto para obtener la experiencia de una aplicación sin el largo tiempo de espera que implicaría una aplicación en toda la empresa.

Naturalmente, en el caso de una empresa pequeña, la planta piloto puede ser toda la empresa.

7.9.1.2. *Educación para el JIT*

En esta fase habrá que extender la educación sobre el JIT a todo el personal de la empresa, haciéndole consciente de los cambios que la implantación supondrá. Dado que el JIT requerirá un mayor uso de su experiencia e inteligencia como parte fundamental para conseguir el éxito de la firma, debe garantizarse una plena asimilación, consiguiendo que cambien las actitudes y percepciones de todo el personal respecto a sus propios papeles y responsabilidades. El grado de éxito de la implantación será directamente proporcional a lo generoso del proceso de educación seguido, de forma que un programa recortado pondrá en peligro a todo el sistema. Aparte de conseguir el entusiasmo de todos los trabajadores en el proyecto, un buen programa de educación debe conseguir, pues, dos objetivos:

a) Proporcionar una comprensión de la filosofía JIT y de su aplicación a la industria.

b) Que los empleados empiecen a aplicar el JIT en su propio trabajo diario.

De acuerdo con ello, «durante el programa de educación en el JIT hay que demostrar a la plantilla que las personas más importantes en la implantación no son los altos cargos, ni siquiera el equipo que dirige el proyecto, sino la mano de obra. La Alta Dirección puede dar el visto bueno, el equipo organizador puede preparar la puesta en práctica, pero el JIT no funcionará si el personal de la fábrica no lo quiere» (O'Grady, 1992, pág. 65). Por último, no debemos olvidar que JIT es una filosofía de mejora continua de las operaciones de la empresa, por lo que el *proceso de educación* no debe acabar una vez implantado el sistema, sino *que debe ser concebido como un proceso de educación continuo.*

7.9.1.3. *Mejorar los procesos*

En esta tercera fase se emprenderán los cambios físicos del proceso de fabricación que mejorarán el flujo de trabajo y que, de no llevarse a cabo, harán difícil, si no imposible, conseguir resultados con el JIT. La totalidad de estos cambios ya han sido estudiados con profundidad en los apartados anteriores y, en resumen, son los siguientes:

- Aplicación del sistema SMED para reducir los tiempos de preparación y facilitar la disminución del tiempo total de fabricación y el tamaño de los lotes de procesamiento. En este sentido «es importante la visita a alguna fábrica que haya adoptado con éxito el sistema SMED. El primer paso es estar unívocamente convencidos de que los cambios SMED son factibles. Si se dice a los trabajadores de la planta que cambios de útiles que necesitan dos horas pueden completarse, por ejemplo, en seis minutos, el 99 por 100 de ellos no lo creerán; incluso si lo creyesen, pensarían que tales mejoras requerirán equipos más sofisticados o grandes incrementos de costes. Sin embargo, si estas personas pueden observar un cambio de útiles SMED en la realidad y examinar el equipo, se asombrarán de que con una medidas tan sencillas se puedan producir unas reducciones de tiempo tan importantes. La comprensión será instántanea y sus ideas cambiarán revolucionariamente» (Shingo, 1990a, pág. 276).
- Cambiar la distribución en planta, encaminándose a conseguir líneas de flujo que, conectadas entre sí, permitan la igualación, sincronización y operaciones de flujo «pieza a pieza».
- Poner en marcha un plan de mantenimiento productivo que haga innecesario mantener inventarios de seguridad para paliar las averías de las máquinas.
- Conseguir un manejo multiproceso por parte de los empleados, para lo cual es necesario dotar a los mismos de una formación que los haga polivalentes.
- En conexión con los aspectos anteriores, conseguir un mix de productos con un programa nivelado.

7.9.1.4. *Mejoras en el control*

Los resultados globales de la aplicación del JIT dependerán en gran medida de la forma en que se controle el sistema de fabricación. Ya sabemos que la base de control de producción del JIT es el propio sistema Kanban, el cual, a través de la disminución de los inventarios en la planta, saca los problemas a la luz y obliga a su resolución. Además, como parte fundamental en la mejora del control, habrá que ejecutar programas de calidad que permitan una inspección del 100 por 100 en la fuente, para lo cual habrá que instalar mecanismos que detecten por sí mismos cualquier producto defectuoso o anomalía de funcionamiento.

Antes de pasar a la quinta y última fase de implantación de un sistema JIT, queremos recoger la sugerencia de Shigeo Shingo (1990*a*, pág. 274) de utilizar un sistema de stock amortiguador hasta tanto los propios sistemas de control del JIT den resultados óptimos. Este sistema consiste básicamente en «congelar» los inventarios de seguridad actuales, utilizándolos para absorber el impacto de los fallos de las máquinas, los defectos o cualquier otra anormalidad de funcionamiento. Se evitará así una transición traumática hacia el cero stocks, proporcionando tranquilidad a los supervisores y trabajadores. Lógicamente, este stock debe ir desapareciendo a medida que se alcancen mayores niveles de control gracias a la aplicación de las técnicas del JIT.

7.9.1.5. *Relaciones con proveedores/clientes*

Esta es la quinta y última fase de cualquier proceso de aplicación del JIT, siendo fundamental para cualquier empresa que quiera obtener el máximo beneficio de la misma. Las nuevas relaciones habrá que establecerlas en el sentido apuntado en el Apartado 7.7.

En cuanto a la duración del proceso de implementación, se recomienda que éste no se haga de forma apresurada, aunque se disponga de todos los recursos necesarios para hacerlo, ya que los cambios que se requieren son tan fundamentales que lleva tiempo asimilar sus implicaciones y absorber la filosofía en el funcionamiento cotidiano de la empresa. Un año, contando a partir de la consolidación de la primera fase, puede ser la duración óptima para desarrollar el resto

de las etapas comentadas anteriormente. La Figura 7.16 muestra cuál puede ser la secuencia lógica de realización de dichas fases, pudiendo observarse cómo las distintas actividades pueden desarrollarse en paralelo, dado que la mayoría requiere personal diferente.

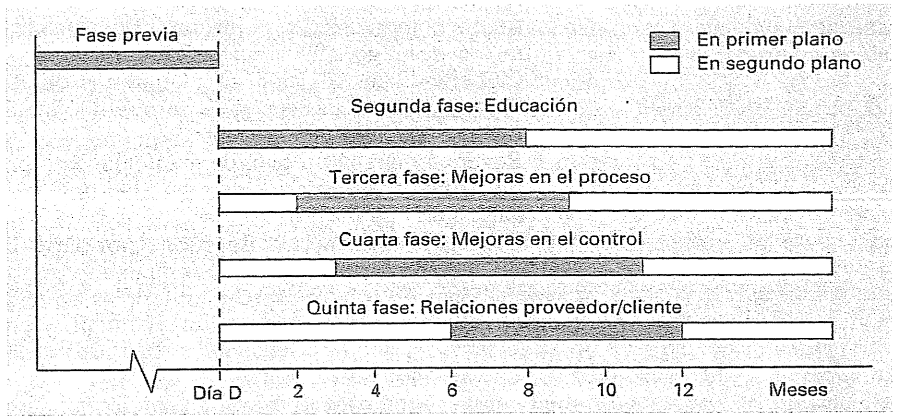


Figura 7.16. Fases para la correcta implantación del JIT (O'Grady, 1992, página 109).

7.10. ALGUNOS BENEFICIOS DERIVADOS DE LA IMPLANTACION DEL JIT

Dado que JIT subraya la sencillez, normalmente se requiere una inversión pequeña de capital para su implantación, aunque es posible que haya que instalar algún equipo adicional y que la reducción del tiempo de producción implique algunos gastos. En resumen, los costes totales implicados en la implantación suelen ser bajos en comparación con los beneficios que puede aportar.

Antes de pasar a enumerar los posibles beneficios que se pueden derivar de la aplicación del JIT queremos resaltar que, al ser la filosofía de fabricación «Justo a tiempo» un proceso de mejora continua, las ventajas no se acaban con su aplicación, sino que habrá que buscar y se podrán conseguir mejoras adicionales durante muchos años. Un buen proceso de implantación encaminará a la empresa hacia la consecución de beneficios significativos que contribuirán, sin duda, a incrementar su ventaja competitiva. A nivel de ejemplo, y dado que a lo largo de las páginas precedentes hemos desarrollado muchos de ellos, sólo relacionaremos a continuación algunos de estos beneficios, validados al haber sido obtenidos por empresas que ya han aplicado el JIT en sus instalaciones[7]:

- Reducciones de los tiempos de preparación de los equipos entre un 70 y un 80 por 100.
- Reducciones del tiempo del ciclo de producción en un 80 o 90 por 100.
- Reducciones de inventario de materias primas de un 35 a un 70 por 100.
- Reducciones de inventario de trabajo en curso de un 70 a un 90 por 100.
- Reducciones de inventario de productos acabados de un 60 a un 90 por 100.
- Reducciones del coste de personal directo entre un 10 y un 50 por 100.
- Reducciones del coste de personal indirecto entre un 20 y un 60 por 100.
- Reducciones de los requerimientos de espacio entre un 40 y un 80 por 100.

[7] Ver, por ejemplo, Vollmann, 1991, o J. A. D. Machuca y P. Luna, 1990.

- Reducciones de los costes de calidad entre un 25 y un 60 por 100.
- Reducciones de los costes de materiales entre un 5 y 25 por 100.
- Aumento medio de las ventas de un 30 por 100.
- Simplificaciones significativas de las tareas administrativas.
- Aumento considerable de la satisfacción del personal con la empresa.

7.11. LA REALIDAD DE LOS NUEVOS ENFOQUES DE PRODUCCION EN ESPAÑA: EL CASO DEL JIT

Al igual que el resto de las firmas occidentales, las empresas españolas han iniciado en los últimos años una búsqueda continua e incansable de nuevas formas de mejorar su actividad productiva; con ello persiguen afrontar con garantías la competencia en un mercado cada vez más competitivo y exigente. Analizaremos en este apartado la situación de la industria española en el proceso de adaptación a los nuevos métodos de gestión de la producción, haciendo especial hincapié en el grado de aceptación de la filosofía «Justo a tiempo» y de sus principios básicos. Para ello haremos uso frecuentemente de los datos recogidos en un estudio realizado por Bañegil (1993) sobre tres sectores industriales españoles, concretamente el del automóvil, el de las tecnologías de la información y el de ingeniería y construcciones mecánicas, analizando una población total de 374 empresas, todas ellas integradas entre las 2.500 mayores del país por volumen de ventas (la muestra final conseguida para realizar el análisis sumó 72 empresas, es decir, un 19,25 por 100 de la población total).

Antes de comenzar a dar datos cuantitativos nos gustaría resaltar dos aspectos a nuestro juicio interesantes. En opinión de las consultoras que en nuestro país se dedican a implantaciones del JIT (Castro, 1990), el proceso de adaptación de las empresas españolas a esta nueva filosofía ha sido más lento que el seguido en el resto de Europa. En ello ha tenido mucho que ver la desconfianza de sus directivos hacia la aplicabilidad en España de unas técnicas que consideraban adecuadas para un país como Japón, con una filosofía propia de vida y de trabajo, pero no para el nuestro. A juicio de estas consultoras también ha retenido este proceso tanto el desconocimiento del tema como la falta de una formación permanente, de una implicación a nivel gerencial y, especialmente, de agresividad comercial y visión de futuro. En general, parece ser que las medidas y cambios efectuados por la mayoría de las empresas españolas son consecuencia de estrategias defensivas y de adaptación a un entorno hostil más que de estrategias de liderazgo (Bañegil, 1993). Sin embargo, afortunadamente para el proceso de modernización de nuestras empresas, las primeras experiencias de implementación en empresas como Enasa y Fagor demostraron la viabilidad de estas técnicas en España. De esta forma, poco a poco fue cambiando la mentalidad de nuestros directivos con respecto a estos nuevos enfoques, pudiendo estimarse, en la actualidad, que aproximadamente, el 70 por 100[8] de los directivos de producción de las empresas de automoción piensan que los verdaderos retos de productividad y competitividad deben abordarse mejorando los medios tradicionales y automatizando sólo en aquellos aspectos de la producción donde se sepa que va ser rentable. Esta consideración los convierte claramente en seguidores de los principios defendidos por la filosofía JIT.

[8] Tanto estos porcentajes como todos los que siguen, referentes al estudio de Bañegil, están calculados sobre el total de las empresas encuestadas.

Del estudio referenciado se desprende que son muchas las empresas interesadas en la filosofía del «Justo a tiempo», sobre todo en el sector del automóvil. Sin embargo, se aprecia que, en muchos casos, donde se dice que se está implantando el JIT, lo que se intenta es utilizar algunos de los elementos que integran dicho sistema; los datos obtenidos sugieren que estas industrias se han fijado principalmente en aquellas técnicas que son más fáciles de implantar, y no en las que, aunque implicando mayor dificultad, reportarían mayores beneficios.

El grado de implantación en España de la filosofía «Justo a tiempo» difiere entre los tres sectores estudiados, siendo el sector del automóvil en el que mayor grado medio de implantación se observa, seguido por el de las tecnologías de información y, por último, el sector de ingeniería y construcciones mecánicas. Sin embargo, a pesar de que las implantaciones realizadas hayan conseguido un relativo éxito, ello no implica que no se hayan producido dificultades en el camino.

7.11.1. Principales resultados conseguidos

En el análisis de los resultados conseguidos por las empresas españolas que han adoptado estos nuevos enfoques de dirección de producción nos referiremos, en primer lugar, al que parece ser la principal preocupación de sus directivos: la *disminución de inventarios*, factor sobre el que la mayoría de las firmas ha conseguido resultados favorables (el 92 por 100 de las empresas del sector de tecnologías de la información y el 94 por 100 del sector de ingeniería confiesan haber conseguido reducciones importantes). Por otra parte, de forma paralela, se ha conseguido una mayor facilidad para adaptarse a los cambios de demanda (por ejemplo, el 93 por 100 de las empresas de automoción afirman haberlo conseguido) y disminuciones de los tamaños del lote y del tiempo de fabricación (elementos para reducir los inventarios (ver Apartado 7.1)). En cuanto a las ventajas conseguidas a raíz de estas disminuciones de stocks, en el *sector de automoción* destaca como principal ventaja la menor inversión, situando como segunda mejora el aumento del espacio libre en la planta; sin embargo, para las empresas del *sector de tecnologías de la información*, la principal ventaja es el mayor control sobre el proceso de fabricación, destacando también las anteriormente mencionadas; por último, para las *empresas de ingeniería y construcciones mecánicas*, además de la menor inversión en inventarios, sobresale el hecho de haber conseguido mejoras significativas sobre los componentes defectuosos.

En lo referente a la *utilización de un sistema Pull de fabricación*, éste es empleado (en todos o algunos de sus productos) por el 64 por 100 de las empresas dedicadas a la automoción o la ingeniería, siendo este porcentaje sensiblemente mayor en el sector de tecnologías de la información (el 84 por 100). Sin embargo, los comentarios anteriores no implican unos valores similares para la utilización del sistema Kanban, ya que muchas empresas aseguran tener este método mucho más desarrollado, afirmando haberlo superado (ver el Apartado 7.11.2). Utilizan terminales de ordenador con impresora en todas las líneas de producción y en los almacenes. En el ordenador central se introducen las órdenes de producción que fluyen desde los terminales a los operarios, sabiendo éstos lo que deben realizar y en qué momento. Por otra parte, en algunas empresas, las tarjetas kanbans han sido utilizadas para reducir los ciclos, pero una vez conseguido este objetivo han sido eliminadas (Bañegil, 1993).

En cuanto a la *nivelación de la producción*, aproximadamente el 93 por 100 de las empresas de automoción consultadas aseguran trabajar con un programa de

montaje nivelado (el 14 por 100 sólo lo desarrollan en algunas de las secciones). Los porcentajes referidos son bastante similares para las empresas dedicadas a las tecnologías de información y algo menores para el sector de ingeniería y construcciones mecánicas (el 61 por 100 de las empresas consultadas).

En relación con el tema de la *calidad*, el 79 por 100 de las empresas consultadas del sector de automoción tienen planificada una estrategia de calidad total; sin embargo, una parte significativa de éstas (el 45 por 100) parece aplicarlo sin una de sus principales herramientas, los círculos de calidad. Esto puede estar originado por la opinión que sobre ellas tienen sus directivos, pues son muy pocos los que piensan que aquéllas constituyen un medio eficiente para la consecución de los objetivos de la empresa. Los temas tratados por dichos círculos son, por orden de importancia, los siguientes: calidad de los productos, reducción de costes, seguridad en el trabajo, rapidez del sistema productivo y, por último, mantenimiento.

Por lo que respecta a los **Planes de Sugerencias**, éstos han sido un éxito en el 43 por 100 de estas empresas, pero un dato interesante es aquel que revela que el número de sugerencias ha descendido en el 29 por 100 de las empresas de este sector, dato que se puede explicar al coincidir con el porcentaje de empresas que han tenido problemas con sus trabajadores a la hora de implantar el JIT (en otros sectores este porcentaje es mucho menor; por ejemplo, el 4 por 100 de disminución en el de tecnologías de información). Otro dato interesante a la hora de evaluar el grado de seguimiento de estas empresas en cuanto a los dictados del JIT es la importancia que otorgan a la prevención de averías y defectos, más que a subsanarlos *a posteriori*. Todas las empresas efectúan intervenciones sistemáticas para conseguirlo (la mitad de ellas afirman estar intentando establecer programas de mantenimiento productivo total, mientras la otra mitad utiliza técnicas de mantenimiento preventivo). Nos gustaría resaltar también que empiezan a desarrollarse las relaciones con los proveedores para temas concretos de calidad; así, por ejemplo, en el sector de tecnologías de la información, el 36 por 100 de las empresas realiza programas de formación para los mismos con el objeto de garantizar la calidad de sus productos.

7.11.2. Aspectos problemáticos en la implantación del JIT en España

7.11.2.1. *El factor humano*

Aunque los datos comentados hasta el momento pueden despejar algunas dudas sobre las posibilidades de la aplicación de técnicas como el JIT en las empresas españolas, no se ha hecho referencia todavía a uno de los aspectos que aparecen como más problemático para la aplicación de dicho enfoque: la reacción de las organizaciones sindicales, o de los trabajadores individuales, ante una forma de trabajo radicalmente distinta. A este respecto, consultoras dedicadas a implantaciones JIT en España comentan que su aceptación por parte de los operarios no es una tarea fácil (suele ser necesario incentivarles y primarles). En España no hay una normativa legal que recoja, por ejemplo, la polivalencia de los trabajadores. Este vacío legislativo hace que las negociaciones con los comités o representantes sindicales sean diferentes en cada fábrica y para cada línea; sin embargo, una vez comprendido el significado de la implantación y la importancia de su colaboración, no surge ningún problema (Castro, 1990). En este sentido, desde que se han implantado las nuevas técnicas en el sector de automoción, un 64 por 100 de las empresas afirman haber mejorado las relaciones con sus trabajadores (un 86 por

100 en el sector de tecnologías de la información), habiéndose establecido la polivalencia en el 71 por 100 de las mismas, lo cual ha llevado a una mano de obra más flexible. Un aspecto imprescindible aquí son los programas de formación del personal, que se dan en la casi totalidad de las empresas.

En relación con la importancia de la colaboración de la mano de obra en el éxito de la implantación, resulta significativo que en todas las empresas en que no existe oposición al proceso, las interrupciones que se producen en el flujo de producción como consecuencia de las disminuciones de inventarios, normalmente no vuelven a repetirse, por encontrarse con prontitud las causas y utilizar la experiencia adquirida. En cambio, en la mayoría de las empresas donde se presenta oposición por parte de los trabajadores, la experiencia adquirida por los mismos, cuando se dan las interrupciones mencionadas, no es suficiente para que éstas no se reproduzcan.

7.11.2.2. *Relación con los proveedores*

Un primer problema reside en la lejanía y dispersión geográfica, que dificulta las entregas frecuentes de pequeños lotes. Por otra parte, son muchos los proveedores reticentes al sistema JIT por creer que la disminución de inventarios que consiguen las empresas clientes se realiza a costa de trasladarlos a los suministradores. Para vencer esta reticencia es necesario estrechar las relaciones entre ambas partes siguiendo las indicaciones de la filosofía JIT en ese sentido. En este sentido, el 91 por 100 de las empresas del sector automoción han disminuido el número de proveedores. Además se han mejorado las relaciones (en el 83 por 100 de las empresas que aplican el JIT) y se han efectuado contratos a más largo plazo. Resultados similares se han producido en el resto de sectores estudiados. Podemos añadir que la mayoría de las empresas proveedoras que están implantando también el JIT en sus plantas de fabricación (más del 80 por 100) espera que, a medio plazo, tambien disminuyan sus stocks de productos terminados. Por último, parece haberse avanzado convenientemente en el intercambio de datos entre las fábricas clientes y los proveedores, donde, por ejemplo, en el sector del automóvil, se está desarrollando el intercambio electrónico de datos (EDI), habiéndose instalado lo que podíamos denominar kanbans electrónicos (ver Cuadro 4.2 y J. A. D. Machuca y otros, 1994, Apartado 9.4.2.1).

7.11.2.3. *El apoyo de la dirección y la formación*

Como se indicó en el Apartado 7.9, es fundamental para el éxito de las implantaciones JIT que la dirección se comprometa de forma decidida con tal proceso, y que comprenda y apoye los cambios que su aplicación va a imponer en sus empresas; cualquier duda o vacilación pondrá en peligro la continuidad o el pleno éxito del proyecto (el ejemplo citado en el Apartado 7.11.1, en relación con los círculos de calidad, puede ilustrar lo que acabamos de exponer). En relación con el papel de los directivos, parece que, en algunos casos, al comienzo de una implantación JIT, se preocupan más por los beneficios conseguidos que por las dificultades encontradas, cuando, en realidad, lo que la Alta Dirección debe hacer es ejercer el liderazgo de la implantación, asumiendo responsabilidades específicas (Bañegil, 1993).

Es evidente que para que el directivo apoye la implantación del JIT necesita una buena formación y un conocimiento profundo de sus distintas técnicas. Para ello, en España, algunas empresas e instituciones están enviando algunos directivos a Japón para que vean *in situ* cómo funciona el sistema; otras empresas

utilizan los seminarios y las publicaciones especializadas. Por otra parte, es denominador común que la mayoría de las empresas que están interesadas en la implantación contraten a consultores especialistas que les ayuden a reestructurar su sistema productivo. Sin embargo, las consultoras confiesan que no quieren establecer con las empresas una «consulto-dependencia», por lo que su estrategia de implantación es la de formar equipos con el cliente y trabajar con él de forma participativa, establecer un plan de seguimiento y sembrar así un embrión que se vaya extendiendo a otras personas e instalaciones. Habría que aclarar, de todas formas, que son las pequeñas y medianas empresas las que mayor uso hacen de consultores externos, ya que las grandes suelen hacer sus implantaciones JIT internamente (Castro, 1990).

Cuadro 7.5. Un ejemplo de aplicación de la filosofía «Justo a tiempo»: El caso de Fasa-Renault en Sevilla (elaborado por Victoria Eugenia Ruiz Orcaray)

Expondremos a continuación el caso concreto de aplicación de algunas técnicas JIT en la empresa FASA RENAULT, S. A., en Sevilla, proceso que la ha convertido en una de las estructuras más modernas y competitivas del actual entorno económico andaluz. Esta empresa centra su actividad en el montaje de cajas de cambio para determinados modelos de vehículos de la marca Renault. Su principal cliente es la factoría que la casa matriz tiene en Valladolid, dedicada al montaje total de vehículos de la marca; sin embargo, también exporta productos al extranjero, concretamente a Dinamarca (U. P. L.), a Bruselas (VILVODRE), a París (BILLANCOURT Y DONAVI), a Portugal (SETUBAL) y a Yugoslavia (REVOZ).

A mediados de los años ochenta, la empresa tomó conciencia de la necesidad de cambiar su sistema tradicional de fabricación, basado en pedidos anuales de los clientes y elaboración de planes de producción a largo plazo, prácticamente inflexibles. Los motivos fueron diversos. Por un lado, la casa matriz había adoptado ya las nuevas técnicas de la filosofía «Justo a tiempo» y, por otro, sus propios clientes, para no verse excesivamente cargados de inventarios, exigían un giro, pretendiendo realizar los pedidos a más corto plazo, en lotes más pequeños y con entregas más frecuentes.

Las acciones llevadas a cabo para implantar el JIT fueron muy diversas. Nosotros nos centraremos, principalmente, en aquellas encaminadas a reducir los stocks y en las destinadas a mejorar la calidad, tanto de los productos como de los procesos.

a) **Reducción de los stocks.**

Se comenzó por la reducción de los componentes adquiridos en el exterior. Aunque el tema se presentaba difícil, la factoría contaba con 242 componentes o referencias de origen externo suministradas por 180 proveedores, propusieron a éstos la realización de entregas más frecuentes, pero en lotes más pequeños. La reacción de los proveedores fue contraria en un principio, pues, además de considerar que la empresa les estaba trasladando el problema del mantenimiento de los stocks, aducían que el realizar más viajes supondría un incremento en el coste del transporte, lo que finalmente repercutiría sobre el precio de sus artículos.

La empresa decidió iniciar su plan haciendo una selección de los proveedores en base al tipo de artículo que suministraban. Comenzó por los de piezas más caras y voluminosas, ya que, debido al importe de las compras, estaba en mejor posición para imponer nuevas condiciones. Tradicionalmente, la factoría realizaba a sus proveedores pedidos no periódicos. Decidió como primera medida cambiar esta política, lanzando para todos ellos pedidos mensuales al objeto de poder exigir entregas más frecuentes en base al mayor y más exacto conocimiento que tendrían dichos proveedores de las necesidades de la fábrica. Este proceso se inició en 1985, consiguiéndose dos años más tarde tener a todos los proveedores en programas de pedidos mensuales.

Posteriormente decidieron pasar a una semana el tiempo entre pedidos. La política seguida fue la misma, es decir, comenzar por los proveedores de piezas más caras, con lo que consiguieron en el año 1988 tener 73 referencias en programas de pedidos semanales. A finales de 1989 sólo quedaban 60 de ellas en estos programas semanales; las 10 restantes, junto con otras 24 más, pasaron a formar parte de un nuevo sistema de pedidos que se inició a principios del año, el denominado **«flujo tenso»**, que supone la realización de pedidos diarios. La previsión para finales del mismo año era tener 40 referencias en flujo tenso.

Además de acortar los plazos de los pedidos a proveedores, la empresa adoptó otra medida para resolver el problema de las entregas más frecuentes y su posible incidencia en el coste de los artículos. Acudió a los denominados **«centros de reagrupamiento»**, mediante los cuales una empresa de transporte se encarga de

recoger los artículos de diferentes proveedores para llevarlos a la factoría.

Con las dos medidas expuestas anteriormente, pedidos frecuentes y centros de reagrupamiento, la factoría consiguió entregas más frecuentes de sus proveedores, incluyéndolos a todos en programas de entregas semanales, ya sea una vez a la semana, dos, tres o, incluso, todos los días. De los 180 proveedores con que contaba, gestionados por tres agentes planificadores, la situación en agosto del 1989 respecto al número de entregas era la que aparece en la Tabla 7.5. El efecto final de las acciones emprendidas por la empresa sobre los stocks de piezas adquiridas en el exterior es el que aparece reflejado en la Tabla 7.6.

Tabla 7.5. Situación de las entregas de los proveedores en agosto de 1989

Tipo de entrega de proveedores					
Agente planificador	Una vez semana	Dos veces semana	Tres veces semana	Todos los días	Total proveedores
5M	19	5	10	5	39
5S	16	4	—	5	25
5L	68	22	12	14	116

Tabla 7.6. Evolución de los stocks de componentes externos

Evolución de los stocks en días				
Concepto de stocks	1986	1987	1988	1989
Materias primas	32,2	12,2	7,9	4,6
Productos origen nacional e importación	7,9	6,3	5,9	4,2
Productos origen Renault	12,7	7,76	4,6	3,9
Productos origen interior	11,6	9	8,3	2,5
Total productos entrada	**9,19**	**7,08**	**4,97**	**4,6**

Al objeto de ir estrechando aún más la relación con sus proveedores para que conociesen las necesidades casi al mismo tiempo que la factoría, la empresa implantó un Sistema de Intercambio Electrónico de Datos.

Respecto a los stocks de productos intermedios y finales, en FASA se dispone de un departamento de métodos, el cual estudia de forma continua el funcionamiento de las líneas de producción al objeto de ir introduciendo las mejoras técnicas necesarias para adaptarse al nuevo sistema de fabricación de series más cortas y variadas.

Por otro lado, utilizan de forma complementaria con el JIT un sistema MRP, concretamente el paquete MRPS, como sistema integrado de planificación, lanzamiento y control de la producción. Con dicho sistema, teniendo en cuenta los plazos de fabricación de los diferentes productos y los tiempos de cambio de las máquinas, establecen la secuencia óptima de producción de forma que se minimicen los tamaños de los lotes.

La evolución de los stocks de productos intermedios y finales, durante el mismo período expuesto, es la que aparece reflejada en la Tabla 7.7.

En lo que se refiere a la eliminación de defectos, se inició un proceso de formación de los encargados de producción en las técnicas de control de calidad. A pesar de encontrarse inicialmente con el rechazo de los mismos para responsabilizarse de tareas que no consideraban suyas, poco a poco fueron aceptando la nueva situación, permitiendo extender la formación a los propios operarios de las líneas, aunque se tardó, aproximadamente, dos años en conseguir que lo realizaran de forma aceptable.

Tabla 7.7. Evolución de los productos intermedios y finales

Evolución de los stocks en días				
Concepto de stocks	1986	1987	1988	1989
Productos intermedios	5,7	4,4	2,4	1,9
Productos en curso	8,9	4,14	6,51	2,9
Productos terminados	6,8	3,7	4,14	3,6
Total productos origen factoría	**7,3**	**3,9**	**3,77**	**2,7**

7.12. MRP Y JIT: ¿DIFERENTES O COMPATIBLES?

MRP antecedió en su nacimiento y desarrollo al JIT, por lo que, cuando este último empezó a ser conocido en los países occidentales, se desató una oleada de comparaciones. Durante algún tiempo, la práctica totalidad de los estudios teóricos realizados al efecto estaban enfocados, principalmente, a descubrir las diferencias entre ambos enfoques y los entornos productivos donde cada uno de ellos resultaba más adecuado. De esta forma se llegó a concluir que MRP estaba especialmente indicado para configuraciones productivas por funciones, producción intermitente, una gama relativamente amplia de productos finales, lista de materiales profunda y utilización de grandes lotes de fabricación (ver Capítulo 5). Por su parte, se identificaba al JIT como el sistema idóneo, cuando la fabricación era de tipo repetitivo o continuo, con una gama más estrecha de productos y concurrían, además, condiciones como la estabilidad de la demanda. También ha sido una conclusión clásica la de atribuir un mayor alcance a la filosofía «Justo a tiempo» por plantear ésta una serie de cambios en el diseño y en la concepción de los sistemas productivos (distribución en planta, reducción de los tiempos de preparación, polivalencia de los trabajadores, calidad total, etc.). El MRP, por su parte, no incide directamente sobre ellos y acepta la complejidad del sistema productivo vigente, al que intenta gestionar de la forma más eficiente posible. En cualquier caso, es evidente que en un sistema productivo mejorado el MRP dará aún mejores resultados. A modo de resumen presentamos en el Cuadro 7.6 algunas de las diferencias más relevantes entre ambos métodos.

Cuadro 7.6. Algunas diferencias entre el MRP y el JIT

Variable	JIT	MRP
Calidad	Objetivo cero defectos. Calidad total. Inspección en la fuente. Responsabilidad de los trabajadores. Control autónomo.	No gestiona la calidad. Tolera cierto desperdicio. Utilización de control estadístico e inspectores de calidad.
Mantenimiento	Constante y efectivo. Mantenimiento Productivo Total. Responsabilidad de los propios trabajadores.	Cuando sea necesario por avería o, en todo caso, mantenimiento preventivo.
Medios informáticos	La mayoría de las funciones son realizadas manualmente. No necesita de grandes medios informáticos.	Sus medios son más sofisticados y costosos. Amplia utilización del ordenador por especialistas.
Cambios de diseño	Cambia los procesos y la planta.	Los toma como están.
Plazo de respuesta	Horario.	Semanal.
Proveedores	Pocos, cercanos y con contratos a largo plazo. Son considerados una extensión de la empresa.	Visión tradicional. Contratos a corto plazo. Muchos proveedores. Relaciones conflictivas.
Programación	Tipo «Pull».	Tipo «Push».
Simulación	No permite la simulación.	Permite simular las consecuencias de variantes en la planificación o programación.
Stocks	No son justificables. Ocultan los problemas. Hay que eliminarlos.	Hay que mantener cierta cantidad de protección, muy especialmente en los items con demanda independiente. Aconseja su reducción.
Tamaño de los lotes	El objetivo es la fabricación unitaria. En todo caso, lotes pequeños. Sólo hay que fabricar las necesidades inmediatas.	Se determinan con diferentes técnicas.
Tiempo de suministro	Su reducción es una meta fundamental.	Acepta los que existen.
Tiempo de preparación	Su reducción es un objetivo fundamental.	Acepta los que existen.
Trabajadores	La riqueza principal de la empresa. Decisiones por consenso. Amplia colaboración.	Dirección jerárquica y por normas. Menos participación del trabajador.

A pesar de las diferencias entre ambos enfoques, éstos no son irreconciliables. Por el contrario, recogiendo las potencialidades de cada uno de ellos, su utilización conjunta no sólo es posible sino que puede llegar a ser enormemente beneficiosa para las empresas. Para fundamentar nuestra afirmación nos apoyamos en los siguientes argumentos:

a) En esencia, y aunque utilicen técnicas distintas, ambos métodos comparten objetivos básicos, como la minimización de los costes, la reducción de inventarios o la consecución del máximo servicio al cliente.

b) No todas las empresas desarrollan un tipo de producción al que podríamos denominar puro, bien de *tipo repetitivo*, bien *por lotes*, sino que, a veces, pueden existir en una misma empresa productos que deben ser fabricados de forma repetitiva y otros que requieren operaciones por lotes. Además, aunque el concepto de lote pueda no llegar a desaparecer en algunas empresas, su tamaño puede reducirse tanto que se asemeje a una fabricación repetitiva. En cualquiera de los casos mencionados no estaría claro cuál sería el mejor método de gestión a aplicar.

c) Cada día parece estar más claro que ambos sistemas pueden llegar a ser complementarios. De esta forma, el MRP II puede aportar al JIT:

- Potentes herramientas de planificación, tanto para determinar el Programa Maestro de Producción como para calcular las necesidades de componentes a suministrar por los proveedores.
- Una ordenación de los pedidos de los clientes y conformar con ellos tasas equilibradas de producción.
- Los cálculos sobre la capacidad necesaria a instalar en los distintos centros de trabajo para adaptarse a las futuras tasas de fabricación.
- La planificación y control en el área productiva ante cualquier modificación de ingeniería que pueda sufrir el producto[9].
- Los beneficios de su actuación *on-line* en aspectos como el control de las operaciones o los aspectos contables.
- Con los cambios oportunos (Schniederjans, 1993), las ventajas de su contabilidad integrada, sin duda más eficiente que cualquier sistema contable informático individualizado.

Por su parte, el JIT, podría complementar a MRP II:

- Utilizando el sistema Kanban en la gestión de talleres.
- Simplificando sus listas de materiales, al agrupar en células de trabajo la obtención de subconjuntos procedentes de varios componentes. De esa forma sólo aparecería en la lista de materiales el subconjunto mencionado.
- Con la fabricación a través de células, donde toda la secuencia de operaciones se realiza en un área muy reducida y de fácil control visual (ver Apartado 7.3). Ello simplificaría la programación de MRP en distintos aspectos: fechas de lanzamiento de órdenes, estados de los inventarios, etc. Utilizando el enfoque JIT pueden conseguirse los mismos resultados con sólo comunicar las necesidades del *output* final al supervisor de la célula, siendo éste el responsable de la terminación en plazo de los productos necesarios.

[9] En Companys (1989) se puede ver un método concreto de cómo utilizar la planificación y programación MRP para la introducción de una modificación de ingeniería en el producto en un sistema Synchro-MRP.

- Reduciendo considerablemente los costes generados con MRP para el control de producción, las compras, el Programa Maestro de Producción, las previsiones, el proceso y seguimiento de órdenes de clientes, etc.

d) Estudios empíricos contrastan la opinión anterior con la realidad. Algunos directivos encuestados indican que existe la necesidad de simultanear ambas técnicas (MRP y JIT): «ninguna de las dos cumple hoy todas las necesidades, pues existen artículos y/o áreas de la fábrica donde se puede aplicar JIT, y otras donde se consiguen mejores resultados con técnicas MRP II. El óptimo se alcanza integrando ambos sistemas...» (Bañegil, 1993).

e) La realidad demuestra que muchas empresas que han optado por un sistema JIT, cuando ya estaban utilizando un sistema MRP, han seguido utilizándolo para planificar los programas de entrega de los proveedores y la operación final de montaje.

f) El último argumento, pero quizá el más contundente, es la existencia de empresas que, sin reunir las condiciones óptimas para la aplicación del JIT, han conseguido resultados enormemente positivos con la aplicación de un sistema híbrido MRP-JIT. El primero de los casos, y quizá el más conocido, es el de la empresa Yamaha Motor Co., organización de gran dimensión y estructura muy compleja, con diferentes tipos de centros de trabajo (tipo *job-shop* y repetitivos), y con una gran variedad de productos y con frecuentes modificaciones en los mismos. Dicha empresa ha diseñado un sistema denominado Synchro-MRP, que le permite aprovechar las ventajas de ambos sistemas utilizando el MRP para labores de planificación y el JIT para la ejecución y el control (Companys, 1989, páginas 133 y ss.).

La Figura 7.17 (elaborada a partir de Scott, 1994, pág. 204) muestra el esquema básico de interconexión entre ambos sistemas.

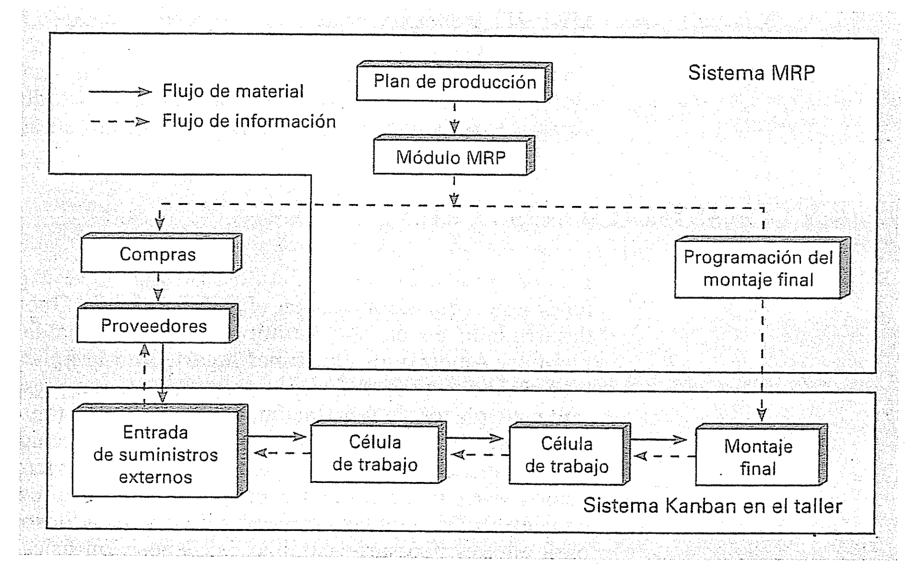


Figura 7.17. Sistema híbrido MRP/JIT.

Normalmente, el camino hacia la integración suele implicar (Scott, 1994, página 198):

- Continuar utilizando MRP para la programación de pedidos a proveedores.
- Programar únicamente el montaje final, normalmente utilizando la programación maestra basada en tasas (ver Apartado 3.9). Si la demanda no es lo suficientemente continua se utilizará el PMP tradicional de MRP (en su versión modular o en la de productos finales, según los casos (ver Apartado 3.8)).
- Utilizar el sistema *Pull* mediante Kanbans para mover los subconjuntos en el flujo de producción y para pedir los materiales a los almacenes y proveedores, eliminando los stocks de seguridad intermedios.

El mencionado proceso de implementación del JIT con MRP puede hacerse empleando el sistema Kanban, que daría las órdenes de fabricación y movimiento de materiales y subconjuntos (ver Apartado 6.4), o bien a través de un *módulo de fabricación repetitiva*, el cual sustituiría al clásico módulo de gestión de talleres (PAC: *Production Activity Control*) del MRP II. En este caso, las órdenes de fabricación no procederán de los Kanbans, sino de la programación lote a lote derivada del MRP. El trabajo en las células sería, pues, «empujado» (sistema *Push*) por MRP, que daría lugar a la obtención de unos stocks disponibles para las operaciones siguientes. Sin embargo, la utilización de los mismos se derivaría de un sistema de tirón *(Pull)* desde el montaje final hacia abajo en función de las necesidades reales.

Queremos apuntar que van creciendo los paquetes de software existentes en el mercado que realizan la integración MRP/JIT, cada uno de los cuales puede distinguirse por algunas características propias (ver Schniederjans, 1993). Entre ellos podemos mencionar el denominado «HP Manufacturing Management II» desarrollado por Hewlett Packard, o el «IBM *Comunications Oriented Information Control System* (COPICS)» de IBM. Es evidente que, cualquiera que sea el software elegido, su aplicación por sí sola no asegurará una buena integración MRP/JIT y el éxito del sistema. Lógicamente habrá que realizar, previamente, los cambios oportunos en la planta de fabricación (ganar en flexibilidad y sincronización), en la actitud de los trabajadores, en las relaciones con los proveedores, etcétera; en resumen, será necesario avanzar en todos aquellos cambios del Subsistema Productivo que hemos ido analizando en este capítulo.

7.13. CONSIDERACIONES FINALES

Hemos comenzado este capítulo con una breve exposición de los cambios que tendríamos que acometer en el Subsistema de Operaciones para que pueda ser desarrollada en él, con garantías de éxito, una fabricación del tipo «Justo a tiempo». Analizamos en primer lugar cómo la aplicación de un sistema de cambios rápidos, como el SMED, permitirá a la empresa disminuir de forma importante sus plazos de fabricación, accediendo, por tanto, a las importantes ventajas competitivas que ello reporta. Pasando por las técnicas necesarias de estandarización empleadas para conseguir una perfecta sincronización de la producción, hemos visto, posteriormente, cómo la flexibilidad conseguida con el Shojinka se convierte en una de las armas principales de la filosofía «Justo a tiempo» y cómo, para ello, es necesario cambiar la disposición física de la planta y conseguir la

polivalencia de los trabajadores. Con respecto a estos últimos, hemos hecho especial hincapié en el importante papel que desempeñan dentro de la organización y en cómo ésta sabe aprovechar sus cualidades a través de los planes de sugerencias y círculos de calidad. Analizados los aspectos referentes a esta última (fundamental en este tipo de fabricación) y al mantenimiento productivo, hemos llegado al final del capítulo, donde hemos intentado clarificar, entre otras cosas, cuáles deben ser las etapas para conseguir una buena implantación de la filosofía JIT, analizando aspectos tan variados como la relación con los proveedores o el papel fundamental de la formación. Con el Apartado 7.11 hemos intentado mostrar empíricamente que el enfoque JIT es exportable a las industrias occidentales (en concreto a las españolas) y que, por tanto, a pesar de las posibles dificultades y adaptaciones, los beneficios potenciales justifican sobradamente el intento. Por último, hemos abordado el tema de las diferencias entre JIT y MRP, así como su complementariedad.

REFERENCIAS Y BIBLIOGRAFIA

ADAM, E., y EBERT, R. J.: «Production and operations management: Concepts, models and behavior», Prentice-Hall International, 1992.

AQUILANO, N. J., y CHASE, R. B.: «Fundamentals of operations management», Irwin, 1991.

ARNOLD, J. R. T.: «Introduction to materials management», Pretince-Hall, 1991.

BAÑEGIL, T. M.: «El sistema *Just in time* y la flexibilidad de la producción», Pirámide, 1993.

BENSON, R. J.: «JIT: Not just for factory. Proceedings from the 29th Annual International Conference for the American Production and Inventory Control Society», octubre, 1986.

CASTRO, A.: «*Just in time* o el camino hacia la competitividad», *CIMworld*, número 18, abril-mayo 1990.

COMPANYS, P. R., y FONOLLOSA, J. B.: «Nuevas técnicas de gestión de stocks: MRP y JIT», Marcombo, 1989.

CROSBY, L. B.: «The Just in Time Manufacturing process: Control of quality and quantity», *Production and Inventory Management*, cuarto cuatrimestre, 1984.

DILWORTH, J. B.: «Production and operations management: manufacturing and services», McGraw-Hill, 1993.

DRUCKER, P. F.: «La teoría de la fabricación que surge ahora», *Harvard-Deusto Business Review*, 45, 1991.

ENCINAS OÑATE, D.: «Sistemas de fabricación y necesidades industriales», *CIMworld*, núm. 7, junio-julio 1988.

EVERETT, D.: «How to implement Kanban», 30th Annual International Conference Proceedings, 1987.

GARCÍA GRAGERA, J. A., y RUIZ ORCARAY, V. E.: «MRP-JIT: La necesidad de una utilización conjunta», VI Congreso Nacional y I Congreso Europeo de la Asociación Europea de Dirección y Economía de Empresa, La Rábida, 1992.

HALL, R. W.: «Kawasaki USA trasferring Japanese Production Methods to the United States», 1982, APICS.

HALL, R. W.: «Estrategias modernas de fabricación», T. G. P., 1988.

HEARD, R. C.: «Pull can almost always use a Push», APICS 27th Annual Conference Proceedings Readings in Zero Inventory.

IKUTA, S., y NAKAJIM, S.: «Mantenimiento productivo total en Japón», en El estilo japonés de dirección de empresas, T. G. P., 1989.

ISHIKAWA, A.: «Principles of QC Circle activities and their effects on productivity in Japan: A corporate analysis», *Management International Review*, vol. 25, 1985.

LABOUCHEIX, V.: «Tratado de la calidad total» (tomo II), CDN-Ciencias de la Dirección, 1992.

MACHUCA, J. A. D.; ALVAREZ, M. J.; GARCÍA, S.; DOMÍNGUEZ, M. A. D., y RUIZ, A.: «Dirección de Operaciones: Aspectos estratégicos en la producción y en los servicios», McGraw-Hill, 1994.

MACHUCA, J. A. D., y LUNA, P.: «Just in time», en *El subsistema productivo de la empresa*, Pirámide, 1990.

MCCLAIN, J. O.; THOMAS, L. J., y MAZZOLA, J. B.: «Operations management: Production of goods and services», Prentice-Hall, 1992.

MCGUIRE, K. J.: «Impressions from our most worthy competitor. A presentation on Japanese approaches to managing the manufacturing resources», Zero Inventories Seminar Proceedings, septiembre 1983.

MEREDITH, J. R.: «The management of operations: A conceptual emphasis», Wiley, 1992.

MONDEN, Y.: «El Sistema de Producción de Toyota», Price Waterhouse e IESE, 1987.

MONDEN, Y.: «Dirección Japonesa de la Producción» en El estilo japonés de dirección de empresas, T. G. P., 1989.

MUHLEMANN, A.; OAKLAND, J., y LOCKYER, K.: «Production and Operations Management», Itman, 1992.

NAKANE, J., y HALL, W. R.: «Hacia una producción sin existencias en curso», Harvard-Deusto Business Review, primer trimestre 1984.

O'Grady, P. J.: «Just-in-Time: Una estrategia fundamental para los jefes de producción», McGraw-Hill, 1992.

TAKAYANAGI, S.: «Dirección japonesa de recursos humanos», en El estilo japonés de dirección de empresas, T. G. P., 1989a.

TAKAYANAGI, S.: «Dirección participativa japonesa», en El estilo japonés de dirección de empresas, T. G. P., 1989b

SCHONBERGER, R.: «Japanese Manufacturing Techniques», Nueva York, The Free Press, 1982.

SCHROEDER, R. G.: «Administración de operaciones», McGraw-Hill, 1992.

SCOTT, B.: «Manufacturing Planning Systems», McGraw-Hill, 1994.

STEVENSON, W. J.: «Production/Operations management». Irwin, 1990.

SCHNIEDERJANS, M, J.: «Topics in Just-in-time Management», Allyn and Bacon, 1993.

SHINGO, S.: «El sistema de producción de Toyota desde el punto de vista de la ingeniería», T. G. P., 1990a.

SHINGO, S.: «Una revolución en la producción: el sistema SMED», T. G. P., 1990b.

VOLLMANN, T. E.; BERRY, W, L., y WHYBARK, D. C.: «Sistemas de planificación y control de la fabricación», T. G. P., 1991.

WATERS, C. D. J.: «An introduction to operations management», Addison-Wesley, 1991.

ZIPKIN, P. H.: «Pros y contras de la implantación de los sistemas "Justo a tiempo"», *Harvard-Deusto Business Review*, 48, 1991.

CAPITULO 8

TECNOLOGIA DE PRODUCCION OPTIMIZADA (OPT) Y TEORIA DE LAS LIMITACIONES (TOC)

8.1. INTRODUCCION[1]

Como ya vimos en capítulos anteriores (4 a 7), en las últimas décadas se ha desarrollado una serie de nuevos enfoques e instrumentos que, incidiendo fundamentalmente en el Subsistema de Operaciones, han contribuido de forma sustancial a la consecución de ventajas competitivas y estratégicas para el conjunto de la empresa. Asimismo, la penetración japonesa preocupaba, y preocupa, a los responsables de empresas occidentales que vieron perder poco a poco su ventaja competitiva (J. A. D. Machuca y otros, Capítulo 2). En este contexto, a final de la década de los setenta, el físico israelí Eliyahu Goldratt creó un nuevo sistema de programación de la producción, al que denominó **Tecnología de Producción Optimizada** (OPT: *Optimized Production Technology*), presentándolo como la alternativa válida para ganar la guerra comercial a los productos japoneses: *«El mundo occidental no tiene por qué transformarse en una potencia industrial de segundo o tercer orden. Basta con que comprendamos los principios correctos y los apliquemos correctamente para que podamos competir con cualquiera»* (Introducción a «La Meta». Goldratt/Cox, 1986).

Este enfoque, basado principalmente en el equilibrado del flujo de producción y en la gestión en base a los recursos cuello de botella, pronto fue aplicado en numerosas empresas occidentales (en 1986 ya lo empleaban 22 de las 100 mayores firmas de Estados Unidos), las cuales alcanzaron rápidamente resultados muy satisfactorios (ver Apartado 8.8). Quizá debido al relativo éxito que tenían las recomendaciones básicas del OPT en el Subsistema Productivo de las empresas fabriles, E. Goldratt comenzó a ampliar sus estudios con el objetivo de conformar un nuevo cuerpo teórico que sirviese para mejorar la gestión de todos los subsistemas de cualquier tipo de organización, ya fuese industrial o de servicios. Para ello siguió el mismo esquema básico de análisis que ya utilizaba OPT, es decir, descubrir las limitaciones del sistema y hacer girar todo el proceso de gestión en base a ellas. A la teoría que, poco a poco, iba conformando le dio el nombre de **Teoría de las Limitaciones** (TOC: *Theory of Constraints*).

En este capítulo trataremos de acercarnos a los principios básicos del enfoque TOC, especialmente en todo aquello que esté referido a la gestión del Subsistema Productivo, y estudiaremos, con la profundidad que permiten los datos conoci-

[1] Agradecemos sus comentarios sobre este capítulo a E. Fernández de Bobadilla (TDL, consultor asociado en Andalucía del A. Goldratt Institute Iberica).

dos, el sistema informático diseñado para la programación y control de las operaciones, el cual es definido por Goldratt como un sistema de información que apoya la toma de decisiones, en contraposición a lo que él mismo considera simples sistemas de bases de datos que sólo sirven para describir la realidad, incluyendo en ellos a MRP (Goldratt, 1994).

8.2. LA META DE UNA ORGANIZACION SEGUN EL ENFOQUE TOC

E. Goldratt hace hincapié en que la única *meta* de una organización con ánimo de lucro es la de ganar dinero, ahora y en el futuro, considerando los restantes objetivos como simples medios para conseguir la meta final. De acuerdo con ello, el autor indica que *será «productivo» para la empresa todo aquello que contribuya a conseguir el mencionado objetivo*. De esta forma, si se aumenta el rendimiento individual de un determinado centro de trabajo (CT) para conseguir un incremento de producción que no es vendible en estos momentos, ello no sería «productivo» para la empresa, al contrario de lo que tradicionalmente se pensaría. Para Goldratt, el análisis del grado de acercamiento de una empresa a su meta debe estar basado en el estudio de una serie de variables financieras a las que denomina *parámetros de gestión*. Estos son el **beneficio neto,** la **rentabilidad** y la **liquidez**; el primero, como medida absoluta del dinero ganado durante un determinado período de tiempo; la segunda, como medida relativa que complementa a la anterior en el sentido de medir la «productividad» del dinero invertido, y la tercera, tomada en el sentido tradicional, la cual puede convertirse en el factor determinante del éxito o del fracaso de una empresa (Goldratt, 1994, página 11).

No es difícil comprender que cualquier aumento del beneficio neto que sea acompañado de un incremento paralelo de la tasa de rentabilidad y de la liquidez acerca a la consecución de la meta, aunque, por desgracia, una buena marcha de los tres parámetros no se dé siempre simultáneamente. Por otra parte, estos indicadores son demasiado generales como para ayudar a la toma de decisiones en los niveles operativos de la empresa. En este punto, Goldratt rompe con los modos de actuación clásicos al afirmar que el «puente» utilizado hasta hoy para enlazar estas decisiones operativas o locales con los «parámetros de gestión» de toda la compañía, el concepto clásico de coste, es erróneo, ya que no conduce eficientemente a la consecución de la meta: *«Casi todos los que han trabajado en una fábrica tienen, al menos, dificultades para controlar las operaciones a partir de rendimientos por costes. Sin embargo, pocos se han atrevido a desafiar directamente a esta "vaca sagrada"»* (Introducción a «La Meta», Goldratt/Cox, 1986). Para el mencionado autor, son estas dificultades las que obligan frecuentemente a los directivos a saltarse las recomendaciones del análisis de costes y a adoptar decisiones en base a su intuición. Este hecho demuestra, según E. Goldratt, que dicho instrumento no es el más adecuado, asegurando, además, que con la combinación de costes e intuición tampoco se logra ganar una carrera competitiva como la que se vive en la actualidad. Como camino alternativo propone otros tres *parámetros*, denominados *de explotación*, que, no siendo de gestión ni tampoco de costes, ayudan a establecer una serie de procedimientos operativos para dirigir las plantas productivas, pues permiten evaluar fácilmente el impacto de una decisión local sobre la meta de la empresa. Estos parámetros, que según reconoce el propio Goldratt eran ya utilizados en la gestión convencional, son definidos utilizando la misma unidad que la meta, el dinero (Goldratt, 1994, pág. 15 y ss):

- **Ingreso neto** (*Troughput*): dinero generado a través de las ventas; es decir, todo el dinero que entra en el sistema[2].
- **Inventario:** todo el dinero que el sistema invierte en adquirir bienes que luego pretende vender; es decir, el conjunto de dinero que, por algún motivo, es retenido en el sistema.
- **Gastos de operación:** todo el dinero que gasta el sistema para convertir el inventario en ingresos netos; es decir, todo el dinero que sale del sistema.

Para discernir si una acción local contribuirá o no a acercarnos a la meta global de la empresa habrá, pues, que evaluar su repercusión sobre cada uno los tres parámetros anteriores. Así, un efecto positivo sobre uno solo de ellos, y negativo sobre los otros dos, podría dar lugar a resultados indeseables para la empresa. La Figura 8.1 (Goldratt/ Fox, 1989, pág. 71) muestra cómo se relacionan los parámetros de explotación con los de gestión, y cómo una correcta actuación sobre los primeros influye positivamente sobre los segundos.

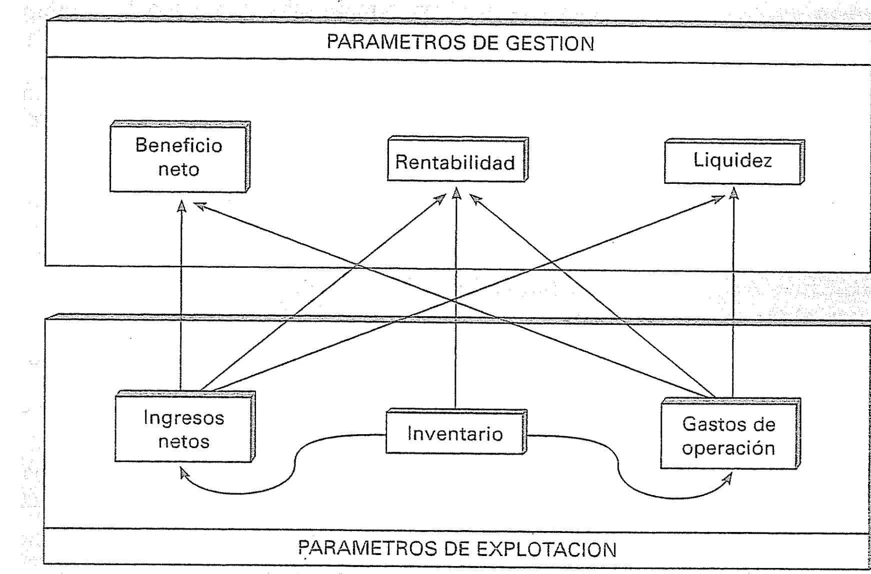


Figura 8.1. Relación entre los parámetros de explotación y los de gestión.

[2] Debemos realizar dos puntualizaciones para aclarar esta definición (Goldratt, 1994, páginas 15 y 16):

a) Habría que suprimir de esta definición la parte que hace referencia a las ventas, ya que también debe ser considerado como ingreso neto cualquier otra entrada de dinero que no esté directamente derivada de la actividad principal (por ejemplo, los dividendos de cualquier inversión en bolsa). A pesar de ello, se prefiere la definición anterior para remarcar que la producción, aunque esté terminada, no debe considerarse como ingreso hasta que se produzca una entrada efectiva de dinero a través de su venta.

b) Estos ingresos netos no deben confundirse con los ingresos totales derivados de las ventas, ya que, aunque existe una relación directa entre la facturación (expresada en unidades monetarias) y estos ingresos netos, a ese importe total derivado de las ventas habrá que sustraer conceptos, como pago de materia prima, subcontrataciones, comisiones de ventas, energía, transporte, etc., que no se puedan considerar como dinero generado por la propia empresa.

En cuanto al orden de importancia de los parámetros de explotación, Goldratt está en contra de lo que se estipula convencionalmente, es decir, de dar una clara preponderancia a los gastos operativos y situar detrás, y por este orden, a los ingresos netos y a los inventarios. Para dicho autor, cualquier organización que pretenda desarrollar un proceso de mejora continua debe situar como primer elemento de referencia los ingresos netos, ya que su incremento no está limitado por nada, al revés de lo que sucede con las posibles disminuciones de los gastos operativos y los inventarios (limitados por el cero). En relación con los inventarios, ya vimos (Capítulo 1) que originan automáticamente una serie de costes directamente proporcionales al nivel de los mismos; pues bien, si se catalogan estos costes como gastos de operación, se comprende fácilmente la relación indirecta entre éstos y el inventario (Figura 8.1). Sin embargo, para Goldratt, esto no aportaría nada verdaderamente desconocido y sustancial y, aunque siendo necesaria, no daría a la reducción de inventarios un papel preponderante en la gestión de la empresa. Dicho autor (1989, pág. 36 y ss.) coincide con la opinión generalizada de que son diversos los elementos que determinan la ventaja competitiva de una organización (ver J. A. D. Machuca y otros, 1994, Capítulo 1) y que un alto nivel de inventarios puede tener una influencia negativa en todos ellos, lo que sin duda acabaría por disminuir los ingresos netos futuros de la organización[3]. En definitiva, debido a sus influencias indirectas sobre los otros dos parámetros, Goldratt propone situar al inventario en el segundo lugar de la nueva escala de valores, colocando en último lugar a los gastos operativos.

8.3. LA TEORIA DE LAS LIMITACIONES (TOC)

La Teoría de las Limitaciones encuentra su punto de partida en la identificación de dos características fundamentales de las organizaciones. En primer lugar, su *estructura jerárquica piramidal;* en este tipo de estructura, los problemas surgen cuando cualquier mando intermedio intenta buscar el óptimo local para su parcela de poder, el cual no tiene por qué coincidir con el óptimo global de la organización (ver Machuca, J. A. D. y otros, 1994, Capítulos 1 y 2). Cuando ello sucede, se potencian las divergencias entre los óptimos locales y globales, debido a que, por su posición, la mayoría de las personas tiene una visión limitada de la empresa; sólo las situadas en la cúspide de la organización podrán tener más fácilmente una visión suficientemente global como para saber qué decisiones pueden contribuir a la consecución de las metas de la compañía. Para asegurar la consecución de estas últimas es necesario coordinar los esfuerzos de todas las áreas de la firma y buscar la integración (ver Capítulos 1 y 2). *En* segundo lugar, *la configuración organizacional como una sucesión de acciones en cadena.* La TOC parte del convencimiento de que el rendimiento de cualquier cadena siempre está determinado por la fuerza de su eslabón más débil, por lo que los directivos deberían dedicar sus esfuerzos a localizarlos y enfocar la dirección global de la firma en base a ellos. Estos eslabones son denominados en TOC **limitaciones** del sistema y se definen como aquellas partes débiles de la organización que le impiden acercarse a la meta.

[3] En Ruiz Jiménez y otros (1993, págs. 220 y ss.) puede verse una comprobación de cómo el inventario influye en los seis elementos de ventaja competitiva enunciados por Goldratt en «La Carrera», contribuyendo, efectivamente, a un aumento de los gastos de operación y a una disminución de las ventas.

En el esfuerzo de sincronización, el objetivo primordial debe ser conseguir que ninguna decisión de un área local pueda repercutir negativamente en una limitación global del sistema, lo cual coincide con lo que ya antes proponía el enfoque de sistemas (ver J. A. D. Machuca, y otros, 1994, Capítulo 1).

Según la TOC, todo sistema que quiera lograr un proceso de mejora continua en la búsqueda de sus metas globales, debería seguir los pasos que comentamos seguidamente (Goldratt, 1994, págs. 50 y ss):

8.3.1. Identificar las limitaciones del sistema

Una vez localizados aquellos recursos que, por su escasa disponibilidad, limitan el rendimiento global del sistema, éstos deben ser «explotados» al máximo, aprovechando toda su capacidad. Ello se debe a que su eliminación inmediata puede ser a veces difícil, o que, de precipitarnos en ésta, podrían acometerse inversiones que, más tarde, podrían revelarse como innecesarias (ver Apartados 8.3.2 y 8.3.4). De aquí el segundo paso de la TOC:

8.3.2. Decidir cómo explotar las limitaciones

Si, por ejemplo, la limitación se encontrase en un determinado centro de trabajo, explotarla significaría obtener el máximo rendimiento de la maquinaria de dicho CT. Ello implicaría eliminar cualquier causa de tiempo improductivo.

8.3.3. Subordinar todo a las decisiones adoptadas en el paso anterior

En la fase anterior se establecía explotar al máximo la(s) limitación(es) de la organización; sin embargo, hay que ser conscientes de que éstas representan un pequeño porcentaje de los recursos totales de la organización. Debido a ello, a pesar de esta decisión, una determinada limitación puede verse obligada a parar su trabajo si los recursos no limitados (la gran mayoría) no le suministran los componentes que necesita. En el sentido opuesto, también será perjudicial para el conjunto de la organización que recursos no limitados y, por tanto, con exceso de capacidad, suministren a la limitación más componentes de los que ésta pueda procesar (por ejemplo: es el caso típico de una máquina no cuello de botella que proporcione componentes a una que sí lo es; todos aquellos suministrados en exceso se convertirán en inventario, con las consecuencias negativas que ello conlleva (Ejemplo 8.2)).

8.3.4. Elevar la limitación

Esto significa superar las restricciones marcadas por su falta de capacidad. No en pocas ocasiones, una vez que se analiza el trabajo de la limitación en el paso dos y, consecuentemente, se decide una forma de explotar al máximo su capacidad, la limitación desaparece. Ello aconseja no precipitarse y realizar este paso en su justo momento, es decir, en cuarto lugar.

Una vez realizados los cuatro pasos anteriores, es posible que, a fuerza de mejorar la utilización de la limitación o de incrementar su capacidad, ésta haya desaparecido. Ello no constituye, sin embargo, el final del proceso de mejora continua perseguido, puesto que de darse la situación mencionada, aparecerá una

nueva limitación en algún otro lugar de la organización. Ello confiere una gran importancia a la quinta etapa de la TOC.

8.3.5. Si en los pasos previos se ha roto una limitación hay que volver al primer paso

E. Goldratt realiza una consideración especial al enunciar este paso. Las limitaciones impactan en todas las áreas de la empresa y, como ya se mencionó, todo se debe subordinar a la consecución de su máximo aprovechamiento. Este comportamiento da lugar a que surjan en la firma muchas reglas, tanto formales como intuitivas, que, de no ser revisadas al aparecer una nueva limitación con nuevas normas para su explotación, se convertirán ellas mismas en limitaciones del sistema (limitaciones políticas). De este análisis surge la ampliación del enunciado de este quinto paso, que ahora se enunciaría así: *Si se ha roto una limitación en los pasos anteriores, hay que volver al primer paso, pero no hay que permitir que la inercia provoque una limitación al sistema.*

Al terminar de enunciar los cinco pasos anteriores, E. Goldratt (1994, pág. 53) comenta que, en realidad, este enfoque, sencillo e intuitivo, seguramente sería conocido con anterioridad, pero que, rara vez, ha sido utilizado debido a que los directivos están atenazados por su educación tradicional, encontrándose inmersos en un mundo donde predominan los análisis basados en los costes. Por último, asegura que el proceso anterior, que debe estar acompañado del deseo de cambio de todos los miembros de la organización, conducirá a cualquier empresa, ya sea industrial o de servicios, a una mejora continua.

8.4. TOC APLICADA A LA GESTION DEL SUBSISTEMA DE OPERACIONES: OPT[4]

Como ya hemos comentado en la introducción de este tema, la Teoría de las Limitaciones dio sus primeros pasos desarrollando un nuevo enfoque en la Dirección de las Operaciones Productivas de la empresa (de ahí la denominación de Tecnología de Producción Optimizada, OPT[5]). Sus principios básicos pueden resumirse en las nueve reglas que comentaremos a continuación, las cuales guardan una perfecta coherencia con los cinco pasos enunciados en el apartado anterior.

8.4.1. Regla 1: No se debe equilibrar la capacidad productiva, sino el flujo de producción

El primero de los modos de actuación de los directivos occidentales, criticado por E. Goldratt en sus publicaciones, es el intento de equilibrar la capacidad de la empresa con la demanda del mercado. Para dicho autor, se demuestra matemáticamente que, cuando ello ocurre, descienden las ventas (y, con ellas los ingresos netos) y suben los inventarios; de esta forma, cuanto más cerca se esté de una

[4] En Ruiz Jiménez y otros (1993, Capítulo 9) podemos encontrar, para un caso concreto, la verificación mediante simulación con Dinámica de Sistemas de cada una de las nueve reglas que vamos a estudiar a continuación.

[5] Debido a que las siglas OPT son más conocidas y a que hacen referencia expresa al estudio del Subsistema de Producción, las utilizaremos a partir de este momento en lugar de la denominación más general de TOC.

planta equilibrada, más lejos se estará de la meta. Para demostrarlo, argumenta que en toda planta productiva se da la conjunción de dos hechos: la existencia de **sucesos dependientes** y de **fluctuaciones estadísticas.** Los primeros vienen determinados por la propia secuencia de operaciones que obligatoriamente tiene que seguir el producto en su elaboración, en un orden predeterminado y rígido. Las segundas aparecen en determinados hechos sobre los que no se puede determinar su cifra exacta, sino sólo sus valores medios (por ejemplo: cuándo se va a producir una avería y cuál será su duración). Las demostraciones matemáticas referidas anteriormente, se basan en el hecho de que las fluctuaciones estadísticas, sólo se ajustan a la media cuando los sucesos son independientes, pero no cuando, como sucede en cualquier proceso de producción, aquéllos son dependientes entre sí, lo que origina que las fluctuaciones se acumulen, provocando que la desviación de una determinada operación oscile alrededor de la desviación máxima de los procesos que la preceden. (Goldratt/Cox, 1986, págs. 112 y ss.)

Para justificar las afirmaciones anteriores no recurriremos a las demostraciones mencionadas, sino que, por su gran claridad, emplearemos el símil utilizado por Goldratt en «La Meta» (1986), donde compara el acontecer diario del proceso de fabricación con una excursión de *boy-scouts*. Utilizaremos también esta analogía para llegar a la primera regla del OPT, la cual se convertirá, posteriormente, en la base del sistema de programación y control conocido como **DBR (Drum = tambor, Buffer = colchón, Rope = cuerda)** (ver Cuadro 8.1).

Cuadro 8.1. Analogía entre el proceso productivo y una marcha de *boy-scouts*

Imaginemos una marcha de *boy-scouts* colocados en fila india, los cuales deben mantener el orden de salida. En un principio todo es perfecto, la fila marcha compacta sin que se produzcan dispersiones en la misma, pero no pasará mucho tiempo sin que aparezcan los problemas. Estos pueden ser de dos tipos: intrínsecos a algunos de los miembros de la excursión (procesos dependientes) o provocados por algún fenómeno aleatorio (fluctuaciones estadísticas).

Un problema intrínseco puede surgir si algún miembro de la excursión va a un ritmo de paso menor que el del resto de sus compañeros o, simplemente, menor que el del que le precede en la fila. Ello provocará que, al transcurrir el tiempo, si cada uno anda al ritmo que le marca su capacidad, aumentará la diferencia existente entre el predecesor y el de menor capacidad y, con ella, la longitud total de la fila (ver Figura 8.2). Sin embargo, para que se produzcan estas dispersiones no es imprescindible que existan fenómenos intrínsecos como el descrito, sino, simplemente, que se produzca algún hecho aleatorio que, por unos momentos, retrase a algún miembro de la excursión. Supongamos que analizamos los componentes de la marcha, X, Y, Z y W, situados en la fila por este orden; si, por cualquier motivo, Y aminora su velocidad, provocará un alargamiento de la fila debido a que, por la imposibilidad de rebasarlo, los que van detrás (Z y W) tendrán que ajustarse a su paso. Fácilmente podría pensarse que la solución vendría del hecho de que Y, una vez repuesto, acelere durante unos momentos para recuperar la distancia perdida y así acortar de nuevo la fila, pero esto no siempre es posible. Debido a que estamos combinando fluctuaciones estadísticas (sensación de sed, atar un zapato, cansancio) con sucesos dependientes (nadie puede sobrepasar al compañero que lleva delante), pueden darse situaciones, como las siguientes, que impidan la recuperación del tiempo perdido:

- Que también X haya sufrido una parada; en este caso, la posibilidad de recuperación del terreno perdido por Y dependerá ahora de que, previamente, X pueda recuperar el suyo.
- Que, para recuperar el terreno perdido, Y decida andar más rápido que la velocidad media establecida, pero que Z y W no tengan capacidad para hacer lo mismo, con lo cual la longitud de la fila no disminuiría.

En cualquier empresa se establece una situación totalmente similar a los sucesos descritos con anterioridad, siendo los problemas intrínsecos la falta de capacidad de algún centro de trabajo en concreto, mientras que los fenómenos aleatorios pueden venir representados por problemas como la falta de puntualidad en la entrega de las materias primas, las averías, los problemas de calidad, el absentismo, etc. En función de esto, la analogía que se establece entre el ejemplo anterior y los sucesos

de cualquier planta productiva es la siguiente (ver Figura 8.2):

- Cada miembro de la excursión se puede asimilar a un determinado centro de trabajo.
- El centro de trabajo que incorpora la materia prima al proceso productivo sería el primer *boy-scout* de la fila, mientras que la terminación del producto sería asimilada con el último.
- La cantidad de productos en curso sería la longitud total de la fila, y la cantidad de productos vendidos coincidiría con el camino ya recorrido y que, por tanto, ya ha sobrepasado el último elemento de la fila.

En base a esta analogía, es más fácil comprender el hecho de que una planta perfectamente equilibrada y que, además, utilice todos los recursos al máximo de su capacidad para conseguir de ellos altos rendimientos, no tiene por qué representar necesariamente una situación óptima. Ello se debe a que, en el caso de que se produjese algún fenómeno aleatorio, por ejemplo, una avería que limite la producción de un determinado centro de trabajo, se darían los siguientes fenómenos:

- Se acumularán los inventarios en curso delante de ese CT, ya que el que le antecede en el proceso productivo sigue suministrándole componentes al ritmo normal y el CT en cuestión los está procesando más lentamente (aumento de la longitud de la fila = aumento de inventario).
- La facturación desciende y, por tanto, los ingresos netos, ya que el último centro de trabajo (por ejemplo: sección de montaje), sólo puede trabajar sobre la menor cantidad de componentes que le suministra ahora el CT que ha sufrido la avería (menor velocidad de los miembros de la excursión que siguen al que se ha retrasado = disminución de facturación).
- La facturación perdida, o pedidos acumulados durante el período de avería será difícil de recuperar, ya que, al estar la planta perfectamente equilibrada, cada CT tiene justo la capacidad necesaria para responder a la demanda presente, pero no capacidad extra para recuperarse del retraso sufrido. Hay que tener en cuenta que las ventas no realizadas significan menos ingresos netos conseguidos.
- Los gastos de operación no tienen por qué disminuir sino que, incluso, pueden aumentar. Ello es debido a los costes originados por mantener grandes stocks de productos semiterminados que son innecesarios y que, de mantener la planta equilibrada de forma continua, nunca se podrán utilizar adecuadamente.

La mejor solución para asegurarnos de que la fila marchará siempre de forma compacta y que no se verá afectada por la ocurrencia de fenómenos aleatorios que pueden provocar alargamientos indeseados de la misma, se podría instrumentar en *dos fases* (ver Fig. 8.3).

En primer lugar, colocando a los miembros de la excursión en orden inverso a su capacidad de andar, es decir: dirigiendo la marcha se pondría al de menor capacidad; en segundo lugar se colocaría al que le siguiese por orden inverso de capacidad y, así, se llegaría hasta el último puesto, donde se situaría al más rápido de los *boy- scouts*. Esta solución, que puede no convencer a simple vista, ofrece las siguientes ventajas:

- Se seguiría recorriendo el mismo camino, puesto que éste no se da por terminado hasta que pasan por él todos los miembros de la excursión (da igual que el más lento pase el primero que el último).
- Se evitarían las dispersiones de la fila puesto que, siempre, el sujeto que va detrás de un determinado compañero tiene más capacidad que éste. Ello implica que, en caso de que cualquiera de los dos sufriera algún retraso, éste sería más fácilmente recuperable.

En segundo lugar, se aumentaría la capacidad del elemento más lento de la marcha, que ahora va primero marcando el ritmo (por ejemplo: aliviándolo de todo el peso que deba transportar, de forma que dedique su energía exclusivamente a andar). Cuanto más camino ande el primero, más camino andarán los demás y antes llegarán a la meta.

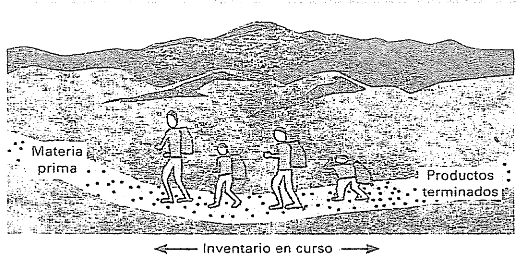


Figura 8.2. Analogía entre el proceso productivo y una marcha de *boy-scouts*.

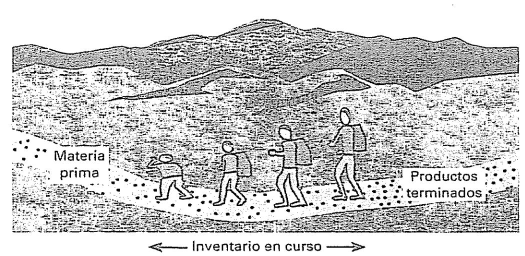


Figura 8.3. La solución propuesta por OPT.

De la analogía anterior, podemos deducir que el intento de equilibrar la capacidad de cada uno de los recursos con la demanda del mercado no es una estrategia demasiado buena cuando se trabaja con una combinación de sucesos dependientes y de fluctuaciones estadísticas, ya que puede que se acumulen retrasos que, después, sea difícil o costoso salvar.

Teniendo en cuenta lo hasta aquí expuesto, Goldratt propone una solución alternativa que sirva de base para dirigir eficientemente las empresas. Esta se basa en el conocido concepto de **cuello de botella**, el cual se produce cuando la capacidad de un recurso es igual o inferior a la demanda. De acuerdo con ello, distingue entre recursos cuello de botella[6] (CB) y no cuello de botella (NCB), y enuncia la primera regla básica del OPT: *«no hay que equilibrar la capacidad y la demanda del mercado. Lo acertado es equilibrar esta última con el flujo de materiales de la fábrica»* (Goldratt/Cox, 1986, pág. 120). Dado que es una realidad palpable que en cualquier empresa puede darse la existencia de recursos C. B. (puede que no permanentes, pero, al menos, coyunturales y móviles) y que son ellos lo que en definitiva van a determinar la capacidad global, éstos deben aprovecharse para controlar el flujo de materiales, intentando a la vez que su capacidad sea lo más parecida posible a la demanda del mercado. El ejemplo de la excursión campestre puede ayudar a comprender la intención de esta primera recomendación del enfoque OPT; precisamente la solución propuesta en el Cuadro 8.1 es la que propone la primera regla del OPT para la producción: *dado que es el recurso CB el que marca la capacidad, debe hacerse que éste marque el ritmo de la programación de la producción.* Con ello, se evitará la elaboración de inventarios innecesarios (alargamientos de la fila), consiguiendo, además, los mismos ingresos netos (puesto que éstos son determinados por el camino recorrido). Si se acepta lo anterior, debe procederse como sigue: primeramente, *no hay que preocuparse de equilibrar la capacidad de la planta, sino de intentar equilibrar el ritmo de producción de los recursos no cuello de botella al ritmo que marca la limitación del CB* y, en segundo lugar, *debe intentarse elevar la capacidad de éste hasta que se logre un equilibrio con la demanda del mercado.* Observemos que cada unidad incrementada en la capacidad del cuello de botella es una unidad más de facturación y, por tanto, implica un aumento del ingreso neto. Efectivamente, puede comprobarse (ver Ruiz Jiménez y otros, 1993, págs. 379 y ss.) que una vez que la empresa implanta estos principios y acomoda el ritmo de los recursos NCB al marcado por el cuello de botella, ésta consigue una mejora significativa en los resultados, protegiendo los ingresos netos y disminuyendo de forma importante el nivel de inventarios en planta.

En la mayoría de los casos, incrementar la capacidad de un determinado centro de trabajo que es CB no tiene por qué significar la adquisición de más capacidad (ver Apartado 8.3), sino la utilización más racional de la existente (por ejemplo: no dedicándola a tareas que no repercutirán directamente en una facturación inmediata, no dejando al CT parado bajo ningún concepto, no dedicando su tiempo a piezas defectuosas, etc.).

Las recomendaciones anteriores tienen una clara repercusión en las labores de diseño de la capacidad productiva en una empresa que pretenda trabajar bajo la óptica OPT/TOC: no tiene sentido dotar a cada uno de sus centros de trabajo con una capacidad en perfecto equilibrio con la demanda del mercado. E. Gol-

[6] Posteriormente, E. Goldratt matiza entre recurso cuello de botella y recurso limitado, definiendo estos últimos como aquellos que a pesar de poseer una capacidad superior a la demanda, sin embargo, tienen una carga cercana al 100 por 100.

dratt (1981) propone la «planta desequilibrada» como alternativa para aquellas empresas que deseen trabajar bajo el prisma de sus teorías. Resumiendo, sugiere dotar a los distintos centros de trabajo de una sobrecapacidad en relación con la demanda del mercado, tanto mayor cuanto más cercano se encuentre el CT de la finalización de proceso productivo. En todo caso, si se produce un cuello de botella, será su capacidad la que habrá que intentar equilibrar con esa demanda externa, mientras que, para el resto de los recursos, habrá que definir su capacidad, de forma que aseguremos, en todo momento, el trabajo del CB y la fecha de entrega del producto terminado.

Una vez comentada la primera regla, debemos conocer más a fondo las particularidades que confiere la existencia de cuellos de botella a la gestión de cualquier planta industrial, lo cual analizaremos a través del estudio de las restantes reglas básicas del OPT.

8.4.2. Regla 2: La utilización de un recurso no cuello de botella no viene determinada por su propia capacidad, sino por alguna otra limitación del sistema

Para comprender el significado de esta segunda regla es necesario que conozcamos previamente las relaciones que se establecen en cualquier empresa entre recursos CB y recursos NCB. Para la explicación de estas relaciones nos remitimos al Ejemplo 8.2.

EJEMPLO 8.2. Posibles relaciones entre recursos cuellos de botella y no cuellos de botella

Utilizaremos tres centros de trabajo, que combinaremos según las necesidades de cada caso: CTA, CTB y CTM, encargándose este último de labores de montaje. Supondremos, además, que los recursos productivos existentes en estos centros se mantendrán todo el tiempo ocupados para conseguir altos rendimientos. En cuanto a la capacidad de los CT, es la misma para todos ellos e igual a 1000 horas estándar (h.e.) por período. Por otra parte, el proceso de producción requiere que, por cada unidad de producto final, se utilicen los siguientes tiempos en cada centro de trabajo: 1 h.e. en CTA, 2 h.e. en CTB y 1 h.e. en CTM. La demanda por período del producto final es de 1000 unidades.

De acuerdo con lo anterior, se comprueba fácilmente que el cuello de botella se encuentra situado en el CTB, ya que su capacidad sólo puede hacer frente al 50 por 100 de la demanda. En base a los datos anteriores y a las posibles posiciones relativas que se pueden establecer entre CTA, CTB y CTM, analizaremos las repercusiones que las mismas tendrían en la evolución de la facturación y de los inventarios. Sólo estudiaremos cuatro posibles situaciones (Figuras 8.4*a* a 8.4*d*), puesto que todas las demás se podrán obtener como combinaciones de éstas.

Primer caso (Figura 8.4*a*): Un CT no cuello de botella (CTA) suministrando componentes a un CT cuello de botella (CTB). No interviene CTM y la demanda es de 1000 un./período.

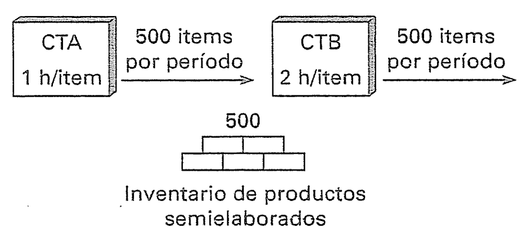


Figura 8.4*a*. Un NCB suminitra a un CB.

Como el lema tradicional es el de mantener a los recursos produciendo en todo momento para conseguir altos rendimientos, se suministrará material al CTA hasta que agote su capacidad disponible, lo que, traducido en número de productos, se transforma en 1000 unidades. El CTB también trabajaría al 100 por 100 de su capacidad, pero teniendo en cuenta que necesita doble número de horas para transformar cada ítem procedente de CTA, al final del período sólo dispondremos de 500 productos finales. Sólo éstos podrán transformarse en facturación, quedando sin procesar 500 productos

semielaborados por período. Vemos, pues, que el trabajar con los CT a plena capacidad se ha traducido en un importante aumento de los inventarios en curso.

Segundo caso (Figura 8.4*b*): Un CT cuello de botella (CTB) alimenta a un CT que no lo es (CTA). No interviene CTM y la demanda es igual a 1000 un./período.

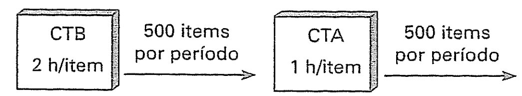


Figura 8.4*b*. Un CB suministra a un NCB.

Es ahora el CTB quien suministra piezas al CTA. Ello implica que, a pesar de que éste dispone del doble de capacidad que el primero, sólo podrá utilizar la mitad de la misma, es decir, la necesaria para procesar los 500 items que le llegan del CTB (cuello de botella).

Tercer caso (Figura 8.4*c*): Dos centros de trabajo independientes, uno cuello de botella (CTB) y otro no cuello de botella (CTA), suministrando piezas al montaje final (CTM). La demanda es igual a 1000 un./período.

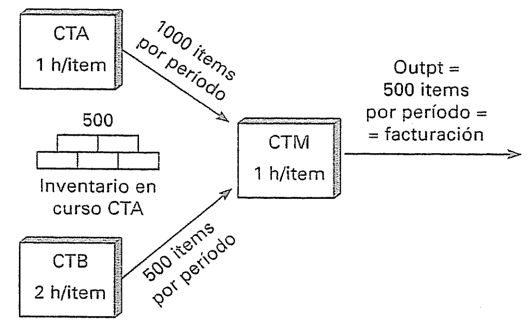


Figura 8.4*c*. Un CB y un NCB suministrando a un centro de montaje.

Si en nuestro caso, CTA y CTB suministran sus productos semiterminados a CTM para que éste, con un ítem de cada uno de ellos, fabrique un producto final, el resultado sería el siguiente: al mantener a los tres centros trabajando al máximo de su capacidad, llegarían al de montaje 500 items de CTB y 1000 de CTA; aunque CTM tiene capacidad para procesar 1000 unidades, sólo puede realizar su labor sobre 500, que es el flujo que llega de CTB. En definitiva, las ventas habrán sido sólo de 500 unidades, mientras que habrán quedado otras tantas en forma de inventario de productos en curso.

Cuarto caso (Figura 8.4*d*): Un CT cuello de botella (CTB) y un CT no cuello de botella (CTA) sirviendo, de forma independiente, al mercado. No interviene CTM y supondremos, sólo en este caso, que la demanda es de 800 un./período.

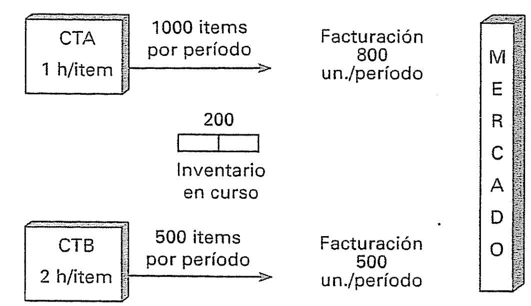


Figura 8.4*d*. Un CB y un NCB suministrando directamente al mercado.

Incluso en esta ocasión, el CT no cuello de botella encuentra una limitación a su actividad puesto que, si trabaja a plena capacidad, al ser ésta mayor que la que le exige la demanda del mercado, una parte de su producción (200 un./período) no se podría vender. De nuevo se acumularían inventarios, pero esta vez de productos terminados.

La conclusión de todos los supuestos recogidos en el Ejemplo 8.2 es la misma: en ningún caso son los recursos no cuellos de botella los que determinan la facturación (o los ingresos netos) del sistema; si, además, éstos trabajan por encima de la capacidad de los recursos CB, lo único que se consigue es aumentar los inventarios, no los ingresos netos. Por otra parte, en todos los casos se deduce que, como asegura la segunda regla del OPT, *lo que podemos obtener de un recurso NCB, nunca está determinado por sí mismo, sino por alguna limitación del sistema.*

No queremos acabar esta explicación, referente a los recursos cuello de botella, sin hacer una puntualización a nuestro juicio importante: es posible que en

una determinada planta de producción exista algún recurso productivo que sea un *cuello de botella* de forma *permanente*; sin embargo, en otros casos, son los propios programas de producción los que originan la saturación de algunos recursos, dando lugar a la aparición de *cuellos de botella intermitentes* por toda la planta.

8.4.3. Regla 3: La utilización y la activación de un recurso no son la misma cosa

Eliyahu Goldratt explica la diferencia entre estos dos conceptos de la siguiente forma: *«"Utilizar" un recurso significa hacer uso de él para que el sistema se dirija hacia la meta. "Activar" un recurso sería como apretar el botón de "encendido" de una máquina, que comenzaría a funcionar, se sacase o no beneficio de su trabajo. Así que, activar al máximo un CT no cuello de botella es una estupidez total»* (Goldratt/Cox, 1986, pág. 180). En los casos anteriores, cuando se hacía trabajar a las secciones NCB a plena capacidad, no se conseguía vender ni una unidad por encima de las que marcaba el recurso saturado; por tanto, no nos acercábamos a la meta, sino que, más bien, al aumentar los inventarios y, consiguientemente, los gastos de operación, nos alejábamos de ella. Ello significa que las secciones estaban activadas, pero no correctamente utilizadas.

8.4.4. Regla 4: Una hora perdida en un cuello de botella es una hora que pierde todo el sistema

Los recursos cuello de botella también podrían ser definidos como aquellos cuyas limitaciones locales de capacidad se convierten en limitaciones para todo el programa de producción (Larrañeta, 1988, pág. 274). La explicación de esta definición y de la cuarta regla OPT se infiere de todo lo que llevamos comentado en las anteriores. Si hemos convenido que es la capacidad del cuello de botella la que, en definitiva, determina la de todo el sistema, tendremos que estar de acuerdo también en que cualquier tiempo que se pierda en él o cualquier disminución de su capacidad, hará disminuir, en igual medida, la capacidad global del sistema. Ello es lógico, pues si el CB dispone de tiempo para procesar items para 500 productos, se venderá dicha cantidad pero, si por cualquier motivo, se pierde tiempo del cuello de botella, de forma que sólo fabricamos para 400, esa será la nueva facturación del conjunto del sistema.

8.4.5. Regla 5: Una hora ganada en un recurso no cuello de botella es un espejismo

Si, como aconsejaba la primera regla, equilibramos la utilización de todos los recursos no cuellos de botella con la capacidad del recurso CB, ello significará, obligatoriamente, que a los primeros les sobrará tiempo. Este tiempo debe permanecer ocioso si no se le da otra utilidad productiva (entendiendo por productivo todo aquello que nos conduzca a la meta); en caso contrario, cualquier aumento de su producción no se traducirá en un aumento de productos finales para el conjunto del sistema, sino en una acumulación de inventarios innecesarios. En base a ello, el enfoque OPT recomienda no invertir dinero, ni energías, en aumentar la capacidad o, simplemente, en ganar tiempo en un recurso que en nada aumentará la facturación de la empresa y que, por tanto, no incrementará ingresos y beneficios.

8.4.6. Regla 6: Los cuellos de botella rigen tanto el inventario como la facturación del sistema

De la explicación de la primera y segunda reglas puede deducirse parte del significado de la que ahora nos disponemos a analizar. En efecto, como se ha podido observar en el Ejemplo 8.2, los CB determinan la facturación y, por tanto, los ingresos netos de la empresa, siendo los que verdaderamente fijan la capacidad de la misma. Por tanto, cuando el cuello de botella está localizado en algún CT de la empresa, la demanda será igual o superior a la capacidad del mismo, por lo que todo lo que se produzca podrá venderse. En relación con la determinación de los inventarios, la explicación puede llegar a ser bastante intuitiva, ya que está claro que éstos se acumularán antes o después del cuello de botella, pero siempre debido a la restricción de capacidad que éste impone:

- Los inventarios se acumulan delante del CB cuando éste es suministrado por otras secciones NCB que no tengan en cuenta, en su fabricación diaria, la limitación que supone el primero.
- Una vez pasado el cuello de botella en el proceso productivo, los inventarios que se acumulan serán aquellos componentes que, procedentes de recursos NCB, necesitan, sin embargo, algún ítem procesado por algún CB.

Si aceptamos lo anterior, no tendrá mucho sentido plantear en la programación de la producción exigencias superiores a la capacidad de los cuellos de botella. Con esta sexta regla, y con las que siguen, OPT arremete, en cierto sentido, contra algunas simplificaciones del sistema MRP, el cual (véase Capítulo 4), realiza la explosión de necesidades suponiendo, en principio, capacidad infinita, aunque, posteriormente, haga consideración expresa de las limitaciones de la misma, modificando, si fuese necesario, el Programa Maestro. Por otra parte, otras simplificaciones del MRP, concretamente el suponer lotes y tiempos de suministro constantes y predeterminados, pueden dar lugar a programas de producción no realistas, que habría que modificar *a posteriori*. En este sentido, OPT destaca que si las limitaciones de capacidad y la variabilidad del tamaño de los lotes y tiempos de suministro se incluyesen desde el principio, no serían necesarias correcciones posteriores y se facilitaría la programación (Larrañeta, 1988, pág. 272).

8.4.7. Regla 7: El lote de transferencia puede no ser, y de hecho muchas veces no debe ser, igual al lote en proceso

En el proceso de fabricación, OPT distingue dos tipos bien diferenciados de lotes. Por una parte, el **lote de proceso**, que se puede definir como el realizado por un determinado centro de trabajo entre dos preparaciones sucesivas y que, tradicionalmente, con objeto de evitar las grandes ineficiencias de los largos tiempos de preparación de la maquinaria, suelen tener un tamaño grande (para conseguir disminuir los costes medios unitarios). Por otra parte, nos encontramos con el **lote de transferencia**, que es el que se usa para transportar items entre dos centros de trabajo. Con frecuencia se utiliza para éste un tamaño igual o similar al del lote de procesamiento, sin reparar que, con ello, se incrementa el tiempo total de fabricación y se acumulan inventarios en curso (ver Ruiz Jiménez y otros, 1993, página 406 y ss). Además, aceptada esta distinción entre lotes, tenemos que admitir que cada uno de ellos da lugar a un tipo de coste totalmente diferente, ya

que el lote de transferencia determinará los asociados al inventario existente en la empresa (cuanto más grande, más costes), mientras que el lote de proceso llevará aparejados los costes de las preparaciones.

La aplicación de la regla 7, enunciada más arriba, posibilita el acortamiento del tiempo total de fabricación, pues un determinado centro de trabajo no deberá esperar a la terminación de un lote completo para comenzar su traspaso al siguiente, sino que podrá hacerlo de forma gradual a través de lotes de transferencias de menor tamaño. Con ello permite que el CT siguiente pueda comenzar antes el procesamiento de artículos, logrando disminuir, si esto se generaliza, la fecha de entrega de la producción final.

El conseguir lo anteriormente expuesto puede implicar que no todos los CT trabajen con el mismo tamaño de lote de procesamiento. OPT propone que, para determinar éste en los distintos centros de trabajo, se deberían tener en cuenta las posibles diferencias de capacidad entre los mismos, de forma que aquellos que se comporten como cuellos de botella podrían aprovecharse al máximo fabricando en grandes lotes, disminuyendo así, si ello fuese conveniente, el tiempo dedicado a las preparaciones. Por lo que respecta a los recursos no cuello de botella, éstos podrían utilizar menores tamaños de lotes de procesamiento, ya que el tiempo ocioso que los caracteriza permite más preparaciones de maquinaria. Los consejos anteriores implican que los lotes de transferencia (que, como dijimos, deben ser lo más reducidos posible) han de ser combinados, si ese fuese el caso, para que formen un lote de proceso grande en el cuello de botella. De estos comentarios se deriva la octava de las reglas básicas.

8.4.8. Regla 8: El lote de proceso debe ser variable a lo largo de su ruta y también en el tiempo

En definitiva, los mensajes de la séptima y octava reglas de la teoría OPT dan licencia para acortar, dividir y solapar los lotes, con lo que resulta más fácil adaptarse al comportamiento dinámico de cualquier sistema de producción, donde los cuellos de botella pueden ser flotantes a lo largo del tiempo, dependiendo del programa de producción a realizar.

8.4.9. Regla 9: Las prioridades sólo se pueden fijar teniendo en cuenta simultáneamente todas las limitaciones del sistema. El tiempo de fabricación es un derivado del programa

Con la novena y última regla, E. Goldratt pretende dejar claro que muchos de los casos en los que los resultados del proceso de fabricación no se corresponden con los esperados, no son achacables a los famosos imprevistos, sino a una deficiente forma de programar la actividad productiva. Por ejemplo, es normal que, una vez que en la empresa se producen retrasos en ciertos pedidos, se decida fabricarlos con la máxima urgencia, incluso interrumpiendo el procesamiento de otras series y sin tener en cuenta la implicaciones que ello puede tener en los distintos centros de trabajo. Por ejemplo, si esa urgencia se traduce en programaciones de series más cortas, que inciden en más preparaciones en el cuello de botella, se estará afectando a todo el sistema en conjunto y retrasando muchos otros pedidos que, a la larga, empeorarán la situación inicial. Es esta falta de análisis, y la frecuente ocurrencia de fenómenos aleatorios desfavorables, la que en la mayoría de los casos provoca retrasos en el proceso de fabricación.

De la lectura del Apartado 8.4 se desprende un mensaje claro: el control de los recursos cuello de botella es el más importante, ya que de ellos dependerán en gran medida los ingresos netos de la empresa y la acumulación de inventarios. Es por ello que, en las plantas que funcionan con OPT/TOC, tendrán una clara preferencia todos los asuntos relacionados con los recursos CB. Por ejemplo: los equipos de mantenimiento de la empresa deben estar preparados de forma permanente para intervenir ante cualquier problema que surja en ellos; la calidad debe ser controlada antes de que los productos hagan uso de las horas limitadas de los cuellos de botella; los items que ya incorporan estas horas deben ser tratados con sumo cuidado, puesto que cualquier circunstancia que dé lugar a la pérdida de uno de ellos (por ejemplo: un defecto en un proceso posterior al cuello de botella) se transformará automáticamente en un producto menos para la venta. Por último, es normal que, en estas empresas, las investigaciones conducentes a mejoras en el proceso productivo se centren, sobre todo, en los recursos CB, o en actuaciones sobre recursos NCB que puedan aliviar el trabajo de los primeros.

8.5. LA SOLUCION DBR: *EL TAMBOR, EL COLCHON Y LA CUERDA*

Ya hemos esbozado cuál es la solución propuesta para conseguir aumentar los ingresos netos, a la vez que se disminuyen los inventarios y los gastos de operación. Siguiendo, una vez más, el símil utilizado por E. Goldratt, explicaremos a continuación el sistema de programación y control de la producción conocido como DBR (*Drum* = **tambor**, *Buffer* = **colchón**, *Rope* = **cuerda**).

En principio apuntábamos que una solución, para mantener compacta la fila de *boy-scouts*, sin sufrir grandes alargamientos, podría ser la de colocar a sus miembros en orden inverso a su capacidad de andar, observándose que, con ello, se conseguirían los objetivos buscados. Dado que no es posible un reordenamiento de los equipos en la planta, de acuerdo con la idea mencionada, es necesaria otra solución, que podría ser la siguiente: para mantener constante la longitud de

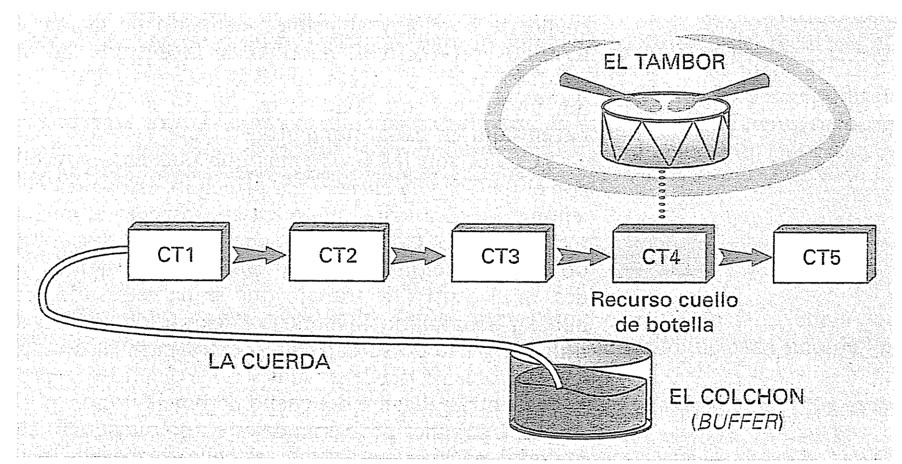


Figura 8.5. El tambor, el colchón y la cuerda.

la fila, sin aminorar su marcha, podría hacerse que todos caminasen a un ritmo constante marcado por los redobles de un tambor, aquél se asimilaría a la capacidad de fabricación del elemento cuello de botella. Además, a lo largo de la fila, se situarían unos «sargentos gritones» para evitar que nadie anduviese a más velocidad que la impuesta por el tambor (el CB). El propio E. Goldratt comenta en su libro *La Carrera* que esta solución es la que se utiliza normalmente en las plantas productivas: «*Utilizar un tambor y sargentos en la planta parece extraño inicialmente, pero ¿no es realmente una práctica común? El tambor es la planificación y control de materiales asistida por ordenador. El sargento es un responsable de producción. El tambor desarrolla planes y programas para indicar cuándo debe ser recibido y procesado el material, y el ritmo del tambor dicta cuándo y cómo debe ser procesado el material por cada recurso productivo. Los sargentos son necesarios porque los pedidos se retrasan constantemente... y hay que empujarlos para cumplir la fecha de entrega... Los sargentos son los responsables de la producción*» (Goldratt/Fox, 1989, pág. 84).

Aunque el anterior comentario es correcto, los resultados reales no suelen corresponderse con los esperados. Normalmente existen grandes cantidades de inventarios, los cuales son debidos a que, en la dirección diaria de la fábrica, suele partirse de ciertas premisas que hacen que el ritmo de *tambor* sea obviado y que cada puesto de trabajo realice su labor de forma independiente. Una de éstas, responsable en cierta medida de la gran acumulación de stocks, es la de intentar conseguir, de cada centro de trabajo, los máximos rendimientos individuales posibles, con lo que no se permite ningún momento de inactividad (constantemente se están liberando componentes a los trabajadores para que éstos no paren). De esta forma, es imposible trabajar al ritmo marcado por el *tambor*, y es seguro que se producirán items que, bien no podrán ser procesados por el cuello de botella, o al menos, no lo serán en el momento oportuno. Así pues, la solución propuesta insiste en la idea de no activar todos los recursos a plena capacidad, sino solamente utilizarlos en la medida que sean necesarios (*ritmo del tambor*), sumándose así a las ideas defendidas por la filosofía «Justo a tiempo» en este mismo sentido (ver Capítulos 6 y 7).

Dado, por tanto, que «el ritmo de los tambores y las voces de los sargentos» son, por sí solos, insuficientes a la hora de gobernar una planta, hay que pensar en alguna otra solución. El DBR propone *«atar con una cuerda»* al elemento cuello de botella y al primer elemento de la fila; en definitiva, y trasladado a términos productivos, acompasar la entrada de materia prima en el proceso productivo a las necesidades del elemento CB, con lo que conseguiremos que ningún puesto de trabajo tenga opción a procesar más componentes que los que hacen falta en cada momento.

¿Cuáles son los problemas que pueden aparecer en una planta que funcione con el *tambor* y la *cuerda*? En principio, éstos pueden proceder de la ocurrencia de fenómenos aleatorios que retrasen, respecto al cuello de botella, a algunos de los recursos NCB. Como veremos seguidamente, la solución será distinta, dependiendo de la situación respecto al CB, de los elementos que se encuentren en dificultades. Si el centro de trabajo que se ha retrasado se encuentra detrás del CB, se habrán acumulado inventarios delante de él; una solución sería que dicho CT utilizase parte de su capacidad extra para recuperar el retraso acumulado.

El problema puede ser más serio si el retraso se produce en alguno de los CT que se encuentran delante del cuello de botella y que, por tanto, le suministran componentes. Cualquier problema de este tipo puede significar que el CB se encuentre sin material para procesar, con el peligro que ello supone (cuarta regla: cualquier hora perdida por un elemento CB es una hora que pierde el sistema en conjunto). Para evitar este problema, el DBR propone el último elemento que completa el sistema DBR: *el colchón* o, para decirlo de forma más precisa, el colchón o *buffer*[7] de tiempo, entendiendo por tal el intervalo de tiempo en que se adelanta la fecha de lanzamiento de un trabajo con respecto a la fecha en la que está programado que lo consuma la limitación[8] (Goldratt, 1994, pág. 110). Con ello, de las tres formas mencionadas en el Apartado 4.6.2 para hacer frente a las rupturas, DBR opta por la de incrementar el tiempo de suministro con un tiempo de seguridad. De esta forma, al lanzar los pedidos con anticipación, pueden ocurrir tres cosas:

a) Que no se produzca ninguna perturbación negativa y que el pedido se acabe antes de la fecha en la que estaba previsto su consumo.
b) Que se produzca alguna perturbación, pero que el retraso que ésta conlleva sea inferior al tamaño del colchón de tiempo.
c) Que el retraso provocado por la perturbación supere al colchón establecido.

En cualquier caso, siempre que el tiempo real de ejecución sea inferior al tiempo de suministro así establecido, el pedido llegará al CB antes de la fecha en que éste va a utilizarlo, por lo que aparecerán inventarios delante de las limitaciones. Es obvio que la determinación de un tamaño satisfactorio para el colchón es una tarea difícil, ya que, aunque sabemos que posiblemente ocurran perturbaciones negativas en nuestros procesos, nadie puede calcular su duración exacta. En todo caso, la longitud del *buffer* de tiempo debe calcularse en función de la duración máxima estimada de los posibles fenómenos aleatorios negativos que puedan retrasar las operaciones, pero siendo conscientes de que, por una parte, un valor excesivamente alto puede aumentar los inventarios y, por tanto, los gastos operativos, disminuyendo los ingresos netos futuros. Por otra parte, un *buffer* demasiado pequeño puede ocasionar, entre otros efectos negativos, el retraso en la producción, y con ello la pérdida de ventas actuales. Por último, diremos que, como veremos cuando abordemos los temas referentes a programación, estos colchones de tiempo no sólo deben ser utilizados para proteger las actividades de los cuellos de botella, sino también las de los puestos de trabajo que ensamblen sus piezas y, si queremos cumplir las fechas de envío, también la limitación que siempre representará los pedidos de los clientes (ibidem, pág. 112). Sin embargo, Goldratt razona en su último libro (1994) que, en el peor de los casos, este colchón puede no resultar suficiente para la completa protección del recurso CB. Para hacer frente a dicha situación, sugiere que se dote a los recursos NCB de más capacidad de la que le exige la demanda, con lo que estos recursos podrían realizar de forma urgente una producción extra. A esta capacidad extra se la denomina *capacidad de protección* y actuará como segundo elemento para asegurar el trabajo de los recursos cuello de botella.

8.6. LA PROGRAMACION CON DBR

Llegados a este punto, la lógica DBR parece estar clara. Sólo falta concretar cómo puede llevarse a cabo la programación de la producción de cada uno de los

[7] Aunque preferiríamos no utilizar el anglicismo, lo emplearemos como sinónimo, pues es el término que aparece en la versión española (1994) de Goldratt (1990).
[8] El concepto es análogo al tiempo de seguridad que vimos en el capítulo dedicado a MRP (Apartado 4.6.2), aunque aquí se relaciona con las limitaciones.

recursos productivos siguiendo el esquema propuesto. Para esta programación será fundamental, como veremos a continuación, saber qué tipo de relación guarda cada recurso con el cuello de botella. Los pasos recomendados (Goldratt/Fox, 1989, pág. 103 y ss) para realizar una programación basada en los principios del DBR se comentan a continuación (Fig. 8.6):

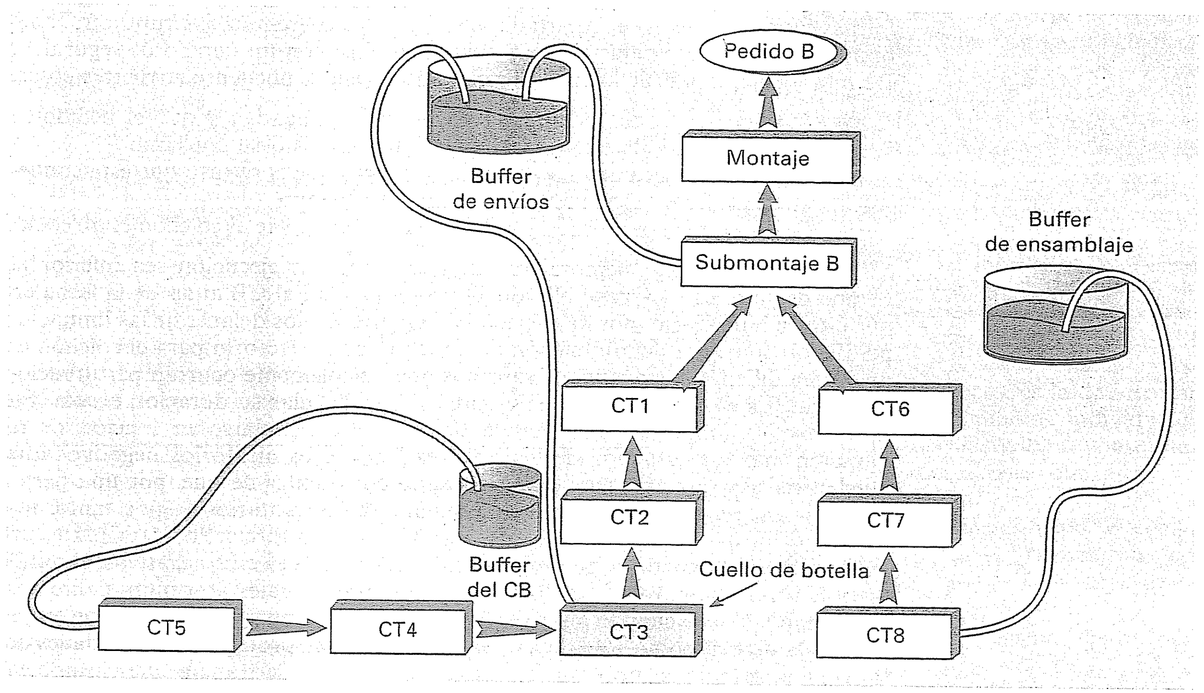


Figura 8.6. La programación con DBR.

8.6.1. Programación del cuello de botella (CT3)

En primer lugar, se debe programar el trabajo a realizar por el cuello de botella (CT3), tarea fácil, pues sólo se tendrá en cuenta su propia limitación de capacidad y los datos relevantes de la demanda que tiene que cubrir (pedido B). Al considerar siempre los pedidos de los clientes como limitaciones del sistema, éstos deben protegerse con la creación de un «*buffer* de tiempo», que, en este caso se denomina «*buffer* de envíos» (BE). Su misión sería la de proteger la fecha de entrega a los clientes, para lo cual, y como regla general el CB deberá comenzar su trabajo con una antelación igual al BE (sobre lo que sería necesario para cumplir la fecha de entrega) (Goldratt, 1994, pág. 179). Por tanto, el programa generado, además de garantizar la plena utilización de la capacidad limitada del CB, debe favorecer un buen cumplimiento de las fechas de entrega. Este objetivo se puede lograr «*programando hacia adelante desde el momento presente, decidiendo qué producto programar primero, en qué cantidad y cuánto tiempo llevará producirlo, y repitiendo el procedimiento. Cuando se ha utilizado la capacidad disponible del primer día, empezar a programar el segundo día, y así sucesivamente. El único problema que queda por resolver es cómo elegir una secuencia adecuada para la programación del cuello de botella; una primera aproximación puede ser la fecha (más próxima) de entrega al cliente*» (Goldratt/Fox, 1989, pág. 112). Existen, sin embargo, determinados casos en los cuales será conveniente no seguir el criterio general de programar antes los pedidos con fecha de entrega más temprana, sino alterar el orden fabricando en primer lugar algunos pedidos más tardíos (ver Goldratt/Fox, 1989, pág. 114 y Goldratt, 1994). Uno de estos supuestos es aquel en que el cuello de botella necesita tiempos de preparación importantes, por lo que puede ser interesante agrupar varios pedidos del mismo ítem o realizar un lote que satisfaga la demanda de varios días, todo ello con objeto de maximizar su utilización y perder el mínimo tiempo en el mismo. Aunque esta forma de actuar puede elevar los inventarios de forma transitoria, no debe perderse de vista que el primer objetivo es aumentar los ingresos netos y, para ello, es fundamental una completa utilización del recurso CB.

Los comentarios anteriores llevan a afirmar que el tamaño de los lotes de procesamiento de los recursos CB no será el mismo en todos los casos, sino que éste será función del propio Programa Maestro a realizar; a veces será interesante trabajar en él con grandes lotes de procesamiento (con objeto de perder el mínimo tiempo en preparaciones) y con lotes de transferencia pequeños (para disminuir al máximo el tiempo global de fabricación).

8.6.2. Programación de los recursos no limitados que siguen en la secuencia de operaciones al cuello de botella y que, por tanto, utilizan componentes ya procesados por él (CT2, CT1 y Submontaje B)

Para CT2 y CT1 se deberá realizar una programación subordinada a la ya realizada para el cuello de botella. Sólo se ha de tener en cuenta la fecha de terminación de los componentes por parte del CB y el tiempo de operación correspondiente a cada uno de ellos. Cada uno de estos centros deberá empezar a trabajar cuando disponga de material para ello. Sin embargo, al programar el CB, vimos que, a veces, era conveniente adelantar algunos pedidos con fecha de entrega más tardía con objeto de aprovechar al máximo su capacidad. Si esto ha llegado a suceder, querrá decir que al puesto de submontaje B podrían llegar las piezas procesadas por el cuello de botella con cierta antelación a lo verdaderamente conveniente y que, por tanto, si este puesto se dedicase inmediatamente a ellas podría originar inventarios innecesarios y, quizá, retrasar injustificadamente algún otro pedido. Para evitar estas situaciones, el submontaje B (y en general todos aquellos centros de trabajo que utilicen piezas de un recurso CB ensamblándolas a otras provenientes de recursos NCB) debe guiar sus actividades teniendo en cuenta la fecha de entrega del pedido y, por supuesto, la duración del «*buffer* de envíos», retrasando el submontaje si las piezas del CB llegasen antes de lo debido.

8.6.3. Programación de los recursos no limitados que anteceden en la secuencia de operaciones al cuello de botella y que, por tanto, le suministran componentes (CT4 y CT5)

La programación de estos recursos se realizará a partir de los datos obtenidos para el CB, de forma que se asegure el pleno funcionamiento de éste. Para conseguirlo es fundamental que se establezca un «*buffer* de tiempo» que proteja al CB de las perturbaciones que se puedan producir. Supongamos que se considera

que una protección de tres días es suficiente para hacer frente a cualquier perturbación negativa que pueda suceder en los recursos que anteceden al CB. En este caso, será suficiente establecer una cuerda con una holgura de tres días que ate al cuello de botella con el recurso que incorpore la materia prima necesaria. En otras palabras, tendremos que programar el comienzo de la primera operación (la que incorpora la materia prima, CT5) con tres días de antelación a lo que sería necesario si tuviésemos el pleno convencimiento de que no fuese a producirse ningún fenómeno aleatorio que retrasase la producción. El resto de operaciones entre esta primera y el cuello de botella (CT4) podrá realizarse según les vaya llegando material.

8.6.4. Programación de los recursos que, si bien no tienen una conexión directa con el CB, fabrican items que, posteriormente, se unirán a otros procesados por éste para componer un producto de ensamble (CT6, CT7 y CT8)

En este caso, de acuerdo con DBR, el programa del submontaje B estará determinado por la fecha en la que estén disponibles los items que, en algún momento, han tenido que pasar por el CB, ya que es esta disponibilidad la que determinará cuándo podemos ensamblar y expedir los productos. Por ello, para proteger la producción y sus fechas previstas de entrega, hay que procurar que, en ningún momento, falten items procedentes de recursos NCB, puesto que eso perturbaría el programa de montaje. Para conseguir este objetivo, se creará otro *buffer* de tiempo delante, CT, que ensambla piezas ya procesadas por el cuello de botella (su cálculo será idéntico al explicado con anterioridad). Para conseguir la protección deseada, se debe realizar la programación de la primera actividad de esta cadena (aquella que incorpora la materia prima, CT8) con una antelación igual al *buffer* de tiempo estimado. El resto de las operaciones, desde la primera hasta el ensamblaje, podrán comenzar cuando les llegue el material.

Por último, queremos que se repare en dos hechos fundamentales:

- Por complicada que sea la planta, siempre se seguirá el proceso mencionado, por lo que, con estas sencillas reglas, se puede programar cualquier sistema complejo. Evidentemente, debido a la posible profusión de datos, será necesaria la utilización de un ordenador.
- La consideración de los *buffers* de tiempo se convierte en una ventaja comparativa para las empresas que trabajan bajo el enfoque OPT, ya que disminuyen ostensiblemente los inventarios intermedios, asegurando, además, la producción vendida.

8.7. EL SOFTWARE DBR[9]

Además de las reglas básicas estudiadas anteriormente, que pueden ayudar a la empresa a recorrer el camino que la acerque a su meta, el enfoque expuesto tiene un segundo elemento clave: el software que utiliza para desarrollar la programación y control de la producción de cualquier planta que funcione de acuerdo con sus principios básicos. Este software, que se concentra en la identificación de los

[9] Sonia Romero, Cecilia Téllez y Ramón Abdesalam han colaborado en este epígrafe.

cuellos de botella y en la programación en base a los mismos, ha sido desarrollado y comercializado por la empresa Creative Output Inc., presidida por E. Goldratt. Dicho paquete se subdivide en distintos módulos de programación con misiones diferenciadas, constituyendo uno de los puntos más oscuros del sistema ya que, como veremos a continuación, parte de estos módulos son actualmente secretos. Es conocida, sin embargo, su operatoria básica, que coincide con los principios expuestos en el apartado anterior.

Antes de comenzar, tenemos que decir que dicho sistema necesita, como entradas, una serie de informaciones clave: rutas de operaciones, lista de materiales, estado de los stocks, tiempos de cambio y procesado, previsiones de demanda, etcétera, las cuales consigue, con frecuencia, de la base de datos de los sistemas MRP. Con esta información, el primer módulo del programa, denominado BUILDNET, realiza una descripción detallada del entorno productivo de la empresa; en ella aparecen, entre otras cosas, las denominadas estructuras de los productos, donde se recogen, de forma conjunta, tanto sus listas de materiales como sus rutas de fabricación, además de poseer información sobre el estado de sus inventarios (Goldratt, 1994, pág. 147 y ss.). Esta información se suministra al módulo SERVE, el cual toma una segunda entrada de información, un Programa Maestro de Producción elaborado de forma independiente (el software no dispone de módulo propio para ello). A partir de éste, se realiza una programación algo parecida a lo que en MRP constituye la explosión de necesidades; en esta primera programación, el módulo SERVE trabaja con la consideración de capacidad ilimitada, ya que su objetivo es la identificación de los recursos limitados a través del cálculo de las cargas originadas por el Programa Maestro. Se considerarán como tales aquellos cuya carga se encuentre cercana o supere al 100 por 100 de su capacidad disponible. Depurada esta información (corrección de los datos, análisis de las relaciones de precedencia entre distintos recursos saturados, etc..) y estudiadas las causas que originan tal saturación, se puede llegar a determinar cuáles son los recursos que condicionan verdaderamente la realización del programa de producción previsto.

Con la información anterior, el tercer módulo, denominado SPLIT, separa a los recursos en dos categorías: *a*) **críticos** (C): los elementos cuellos de botella y en general todos aquellos otros que, aunque dispongan de exceso de capacidad, desarrollen su trabajo en algún momento sobre piezas procesadas previamente por el recurso limitado; *b*) **no críticos** (NC): el resto de recursos. Realizada esta subdivisión, será el módulo OPT, que permanece en el más absoluto secreto, el encargado de realizar la programación concreta de los primeros, para lo cual se considerará la capacidad finita de cada uno de los recursos, cambiando el Programa Maestro de Producción, si fuese necesario, para adecuarlo a estos datos de capacidad. Esta programación será realizada siguiendo las indicaciones generales que ya hemos analizado en el apartado anterior (programando en primer lugar el cuello de botella, considerando los *buffers* de tiempo, tamaño de los lotes de procesamiento y transferencia, etc.), pero siempre con el objetivo claro de maximizar la utilización de los CB y conseguir una perfecta sincronización del flujo de producción, dejando un tanto al lado las consideraciones sobre los costes. Con respecto a la programación de las NC, ésta se lleva a cabo en el módulo SERVE, el cual, utilizando los datos proporcionados por el módulo OPT, la realiza de forma que se satisfagan las necesidades de los recursos críticos. Ya sabemos que, dado que los NC tienen capacidad sobrante en relación con el programa a desarrollar, deberán ajustar su nivel de utilización al ritmo marcado por la producción de los críticos.

A la descripción anterior habría que añadir dos consideraciones. Por una parte, el sistema ofrece al usuario la posibilidad de perseguir objetivos concretos. Por ejemplo, si la meta prioritaria de la empresa fuese conseguir el mínimo coste posible, se puede efectuar la programación minimizando los costes de las preparaciones y dejando, por tanto, en un segundo término, los aspectos relacionados con los tiempos de entrega. Sin embargo, si este último aspecto fuese el más importante para la firma, el ajuste de los programas realizados favorecerá, siempre que ello sea posible, el cumplimiento de aquéllos sobre los costes originados por las preparaciones (Browne, 1988). Por otra parte, el software mencionado, además de elaborar programas de producción realistas basados en consideraciones explícitas de capacidad, ofrece la posibilidad de ser utilizado como una potente herramienta de simulación y análisis, permitiendo al usuario, de forma rápida y fácil, comprobar *a priori* los efectos de cualquier mejora planeada o de cualquier modificación en el sistema de producción: rutas alternativas, distintos tiempos de proceso del lote, sustitución de recursos, retrasos impuestos, agrupación de máquinas, prioridades relativas, etc. (Lundrigan, 1986).

8.8. ALGUNOS RESULTADOS

A pesar de su corta historia, OPT, y su generalización, la TOC, se han extendido rápidamente, y cada vez más empresas utilizan sus principios básicos y su software en la gestión diaria de sus operaciones. En este sentido, podemos señalar que en 1986 ya era utilizado por 22 de las 100 mayores empresas de Estados Unidos, contándose entre ellas General Motors, General Electric, Sikorsky, Westinghouse, Cartepillar Tractors y Rank Xerox. A pesar de lo anterior, el elaborar este apartado se encuentra con la dificultad del secretismo que rodea, a veces, a todo lo relacionado con este enfoque, lo cual, no sólo afecta al sistema informático, sino también a los resultados obtenidos (a veces, la información no parece muy fiable); sin embargo, el paso del tiempo va revelando algunos datos. Así, por ejemplo, se sabe que una de las plantas de la división Saginaw, del grupo General Motors, ha conseguido una tasa de rotación de stocks de más de 100 por año utilizando este enfoque, en contraposición con una rotación de 17 cuando todavía no utilizaba el sistema. Por otro lado, la fábrica Bromont, de General Electric, especializada en la elaboración de turbinas para motores de avión, no sólo ha reducido sus plazos de fabricación en un 60 por 100, sino que ha aumentado su producción en más del 50 por 100. Otra empresa, la filial francesa de Bendix, especializada en la fabricación de equipamientos de automóviles, ha reducido sus costes de producción en un 15 por 100 y ha mejorado su margen de autofinanciación en un 25 por 100. Centrándonos en la reducción de inventarios, podemos citar los resultados conseguidos por las siguientes empresas: General Motors, el 75 por 100; STC, el 50 por 100; Bendix France, el 40 por 100; Howmet, el 60 por 100; Sirkorsky, el 70 por 100; Arrowhead Metals, el 60 por 100. Además, como ya hemos citado, estas reducciones de inventarios están normalmente acompañadas por aumentos de la producción, reducciones de los plazos de fabricación, disminución del tiempo de entrega, etc. (Wheatley, 1986).

A los resultados analizados anteriormente habría que añadir algunas otras ventajas de la implantación del enfoque TOC. Así, al no requerir grandes cambios físicos ni organizacionales como el JIT, su proceso de implementación resulta más fácil y rápido. Por otra parte, el sistema informático estudiado goza de una gran velocidad de ejecución, muy superior a la de los sistemas MRP.

8.9. CONSIDERACIONES FINALES

Hemos analizado algunos resultados conseguidos en distintas empresas con la aplicación del enfoque TOC en su vertiente productiva, el OPT. A pesar de estos resultados, debido quizá a que faltan aún estudios detallados de su teoría y al secretismo que acompaña al software, a los procesos de implantación y a los resultados conseguidos, este enfoque no está exento de críticas. Así, para algunos autores (Browne, 1988), éste tiene dos componentes claramente diferenciados: uno filosófico, sustentado por sus ya famosas nueve reglas, y otro informático a través de su paquete de software; para otros, sin embargo, las nueve reglas no aportan en realidad nada nuevo, situando su mérito sólo en la crítica que realizan a las excesivas simplificaciones de sistemas como el MRP y en su enfoque más sistémico y dinámico del Subsistema de Operaciones. Estos otros autores lo definen básicamente como «un sistema informático de programación y control de la producción que proclama como principal característica el tener en cuenta, explícitamente, las consideraciones de capacidad para obtener el programa detallado de lanzamiento de órdenes» (Larrañeta, 1988, págs. 271 y 276).

Por nuestra parte, en este capítulo hemos realizado un breve repaso a los principios básicos del enfoque TOC, no habiendo entrado en la polémica de si llega a conformar o no una nueva cultura empresarial o, simplemente, se queda en un buen paquete informático de programación y control de la producción. En cualquier caso, TOC puede aplicarse en empresas que tengan configuraciones no repetitivas, tomando la fabrica como está y no necesitando, como la filosofía «Justo a tiempo», cambios en la organización y métodos de trabajo, en la actitud de los trabajadores, en las relaciones con los proveedores, etc., lo que no quiere decir que debe renunciarse a cualquier mejora en estos aspectos.

También es justo reconocer que este enfoque comporta una visión más sistémica del Subsistema Productivo en particular y de la empresa en general, rechazando explícitamente la consecución de óptimos locales siempre que ello no repercuta en un acercamiento a la meta final de la empresa; en definitiva, en conseguir un óptimo global de la misma. Una comprobación de este aspecto puede verse en un estudio realizado por Ruiz Jiménez y otros (1993, Capítulo 8) donde se comprueba cómo, por ejemplo, renunciando a la consecución de altos rendimientos individuales, OPT logra mejores adaptaciones ante los procesos que impliquen una disminución de demanda, facilitando, además, la eliminación de los frecuentes fenómenos oscilatorios que aparecen en muchas variables empresariales. Por último, nos gustaría resaltar que su creador concibe la carrera competitiva como un proceso de mejora continua, por lo que ésta no debe darse por finalizada con los primeros resultados positivos que se deriven de la aplicación del sistema, sino que la empresa debe situarse en un esfuerzo continuado y diario por conseguir mejorar sus procesos y ganar así la carrera competitiva.

REFERENCIAS Y BIBLIOGRAFIA

AQUILANO, N. J., CHASE, R. B.: «Fundamentals of Operations Management», Irwin, 1991.
ASHCROFT, S. H.: «Applying the Principles of Optimized Production Technology in a Small Manufacturing Company». Engineering Costs & Production Economics. Agosto, 1989.
BENCHIMOL, G.: «Systèmes de Gestion de Production discontinue», VTS Bulletin núm. 5, octubre 1990.
BENCHIMOL, G.: «Tecnologie optimisée de production». CPE Bulletin núm. 28, junio 1986.
BROWNE, J., y otros: «Production management Systems: A CIM perspective», Addison-Wesley, 1988.
CHARTLAND, R.: «Application of the OPT systems for detail resource planning». 27th APICS Conference Proceedings, 1984.
DILWORTH, J. B.: «Production and Operations management», McGraw-Hill, 1993.
EDWARDS, J. B.: «At the crossroads», Management Accounting. Septiembre, 1985.
FOX, R. F.: «MRP, KANBAN, or OPT? What's best?», Inventories and Productions. Julio-agosto, 1982.
FOX, R. F.: «OPT an answer for America (Part II)», Inventories and Productions. Noviembre-diciembre, 1982.
FOX, R. F.: «OPT an answer for America (Part III)», Inventories and Productions. Enero-febrero, 1983.
GIAUGUE, W. C., SAWAYA, W. J.: «Strategies for Production Control». Production & Inventory Management Journal. Third Quarter, 1992.
GOLDRATT, E.: «Optimized Production timetable: a revolutionary program for industry», 23th APICS Conference Proceedings, 1980.
GOLDRATT, E.: «The unbalanced plant», 24th APICS Conference Proceedings, 1981.
GOLDRATT, E.: «100 por 100 Data accurancy. Need or Myth?», 25th APICS Conference Proceedings, 1982.
GOLDRATT, E., COX, J.: «La Meta: Un proceso de Mejora Continua», Editorial Taular, 1986.
GOLDRATT, E., FOX, R.: «La Carrera», Editorial Taular, 1989.
GOLDRATT, E.: «El síndrome del pajar», Editorial Díaz de Santos, 1994.
HUSIMAN, H. H., POLDERMAN, G. L., WEEDA, P. J.: «Maximizing Throughput in Some simple Time-Constrained Scheduling Situations», Engineering Costs &Production Economics, 1990.
JACOBS, F. R.: «The OPT Scheduling system: A Review of a New Production Scheduling System», Production & Inventory Management, Third quarter, 1983.
JACOBS, F. R.: «OPT Uncovered: Many Production Planning and Scheduling Concepts can be applied with or without the Software», Industrial Engineering, 1984.
JACOBS, F. R.: «Principles into practice with OPT», Engineers. Comunicating design and Manufacture. Mayo, 1986.
LARRAÑETA, J. C. y otros.: «Métodos modernos de Gestión de la Producción», Alianza Universidad, 1988.
LUNDRIGAN, R.: «Order Point to MRP to ... ?», Manufacturing Systems. Abril, 1985.
LUNDRIGAN, R.: «What is this thing called OPT?», Production and Inventory Management. Segundo trimestre, 1986.
MACHUCA, J. A. D.; ALVAREZ, M. J.; GARCÍA, S.; DOMÍNGUEZ, M. A. D.; RUIZ, A.: «Dirección de Operaciones: Aspectos estratégicos en la Producción y en los Servicios», McGraw-Hill, 1994.
MCCLAIN, J. O.; THOMAS, L. J.; MAZZOLA, J. B.: «Operations management», Prentice-Hall, 1992.
MELETON, M. P. JR.: «OPT. Fantasy or breakthrough?», Production and Inventory Management, Second Quarter, 1986.
MUHLEMANN, A.; OAKLAND, J.; LOCKYER, K.: «Production and Operations Management», Itman, 1992
NEELY, A. D.; BYRNE, M. D.: «A simulation Study of Bottleneck Scheduling», International Journal of Production Economics, febrero, 1992.
NEWMAN, WILLIAM-SRIDHARAN: «Manufacturing Planning and Control: Is there one definitive answer?, Production & Inventory Management Journal. First Quarter, 1992.
OLHAGER, J.; OSTLUND, B.: «An Integrated Push-Pull Manufacturing Strategy», European Journal of Operational Research, abril, 1990.
RAMSAY, M. L., BROWN, S., TABIBZADEH, K.: «Push, Pull and Squeeze Shop Floor Control with Computer Simulation», Industrial Engineering, febrero 1990.
RONEN, B.; STARR, M.: «Synchronized Manufacturing as in OPT: From Practice to Theory», Computers & Industrial Engineering, 1990.
RUIZ JIMÉNEZ, A., MACHUCA, J. A. D., MACHUCA, M. A. D.: «Estudio de los Sistemas de Planificación de la Producción mediante Dinámica de Sistemas: elaboración y comparación de un modelo básico y un modelo OPT», Dpto. Economía Financiera y Dirección de Operaciones. Universidad de Sevilla, 1993.
RUIZ JIMÉNEZ, A.; MACHUCA, J. A. D.; MACHUCA, M. A. D.: «Utilization of System Dynamics for Companing Traditional and OPT Production Systems», en *System Dynamics: Exploring the Boundaries* (E. Wolstenholme, Editor), Ed. System Dynamics Society, 1994.
RUIZ USANO, R.; CLAVIJO, R.; CRESPO, A.; MARTÍNEZ, L.: «Tecnología de Producción Optimizada: sistemas OPT/DBR/TOC», Alta Dirección, núm. 155, 1991.
SCHRAGENHEIM, ELI-RONEN, BOAZ: «Drum-Buffer-Rope shop Floor Control», Production & Inventory Management Journal, Third Quarter 1990.
SCOTT, B.: «Manufacturing Planing Systems», McGraw-Hill, 1994.
SWANN, D.: «Using MRP for Optimized Schedules (Emulating OPT)», Production & Inventory Management. Second quarter, 1986.
WHEATLEY, MALCOLM: «How to Beat the Bottlenecks», Management Today. Octubre, 1986.
WHEATLEY, MALCOLM: «Optimising Production's Potential», International Journal of Operations & Production Management, 1989.

CAPITULO 9

PLANIFICACION Y CONTROL A MUY CORTO PLAZO

9.1. INTRODUCCION A LAS ACTIVIDADES DE EJECUCION Y CONTROL

En capítulos anteriores hemos analizado varios niveles del proceso de Planificación y Control de la Producción (Apartado 1.2). Partiendo de los Objetivos y Planes Estratégicos a Largo Plazo hemos llegado a la obtención del Plan de Materiales, ya a corto plazo, pasando por la elaboración de los Planes Agregado y Maestro de Producción y de los respectivos Planes de Capacidad. Nos resta, pues, el desarrollo de las actividades de Ejecución y Control, ya en el último nivel del proceso.

Aunque el Plan de Materiales establece los lotes a obtener de cada ítem componente y producto final en cada momento del horizonte temporal seleccionado, ejecutarlo en las instalaciones productivas no es una tarea simple. La concreción de ese plan no es suficiente para que cada responsable, o trabajador de un Centro de Trabajo (CT), conozca las actividades concretas que ha de desarrollar en cada momento para cumplir el mismo, de forma que, además, se logren los objetivos establecidos en los sucesivos niveles. Por un lado, los pedidos contenidos en el Plan de Materiales no son independientes, existiendo entre ellos una relación de prioridad que es imprescindible respetar (por ejemplo, no se puede comenzar a fabricar un pedido de un ítem sin haber obtenido antes los componentes o/y materias primas que precisa). De otro lado, las rutas de los items pueden pasar por diferentes CT, con el agravante de que diferentes pedidos de distintos items pueden requerir en su ruta operaciones que han de realizarse en las mismas instalaciones. Incluso puede ser que una operación determinada de un ítem concreto pueda ejecutarse en una única instalación o en varias diferentes. Teniendo en cuenta todo esto, ¿qué pedidos deberá elaborar cada CT?, ¿en qué orden deben realizarse?, ¿cuáles son las fechas de comienzo y finalización de cada operación?

Aunque la cuestión puede parecer complicada, tal y como la hemos planteado hasta aquí, lo cierto es que sólo se ha considerado una parte del problema; la realidad es aún más compleja. Por un lado, la asignación de los trabajos a las máquinas y su posterior secuenciación en las mismas están condicionadas por la capacidad disponible de cada una y por las disponibilidades de materiales en el momento de emisión de los pedidos. Por otro lado, la forma en que se haga conllevará importantes consecuencias, pues ésta influirá en el tiempo total empleado en la realización de los trabajos, en el volumen de la producción en proceso, en la eficiencia, en los costes, en las fechas de terminación de los pedidos

establecidos en el Plan de Materiales y, por consiguiente, en el nivel de servicio a clientes.

Considerando todo lo anterior, se llegará a un Programa de Operaciones para un horizonte de entre unas horas y varias semanas (en función del caso), el cual es imprescindible para que cada trabajador, o cada responsable de una instalación, sepa en cada momento qué ha de hacer para que se logre el Plan de Materiales y, con ello, el Programa Maestro, el Plan Agregado y los Planes y Objetivos Estratégicos de la empresa.

No obstante, la elaboración del Programa de Operaciones no es más que una de las funciones que hay que desarrollar en esta fase de Ejecución y Control. Es evidente que van a existir divergencias entre lo planificado y los resultados de la ejecución. Se hace necesario, pues, controlar los múltiples aspectos de la actividad diaria: cantidades de items realmente obtenidas tras las operaciones (y, con ello el control de los defectuosos), la eficiencia y utilización de los CT (básicos para medir la capacidad de cada uno de ellos en horas estándar), las fechas de entrega, los tiempos de suministro, la evolución de las colas de espera y, con ellas, la adecuación de las capacidades y cargas planificadas a las reales, etc. Sólo así será posible detectar las divergencias significativas entre los valores planificados y los reales, en base a las cuales se adoptarán las medidas correctoras necesarias, que se retroalimentarán a los distintos niveles del sistema, de forma que las informaciones utilizadas se mantengan siempre actualizadas.

Todo este conjunto de actividades se engloba en lo que vamos a denominar, para el caso más general, **Planificación y Control a muy corto plazo**[1] y que, para el caso concreto de las empresas fabriles, identificaremos como **Gestión de Talleres**. *Dichas actividades están encaminadas a programar, controlar y evaluar las operaciones de producción a muy corto plazo, para lograr el cumplimiento del Programa Maestro con la capacidad disponible y con la mayor eficiencia posible*. Ello es aplicable a cualquier tipo de actividad productiva, sea industrial o de servicios, y con cualquier tipo de configuración; eso sí, como posteriormente veremos, la complejidad y la forma de desarrollarlo variará en cada una de ellas. En cuanto a las actividades mencionadas, podrían reunirse en **seis funciones básicas**:

- *Evaluación y control de los pedidos a fabricar* del plan de materiales (o Programa Maestro, si el anterior no existiera), estableciendo los que han de emitirse en cada momento y elaborando la información necesaria para su emisión, tras comprobar la disponibilidad de los materiales que necesita.
- *Establecer las prioridades entre los pedidos* o trabajos a desarrollar, ordenándolos por Centros de Trabajo y asignándolos previamente a cada uno de ellos si fuera preciso, obteniendo así el **Programa de Operaciones**.
- *Rastrear la evolución de los pedidos en curso* a través de los CT, estableciendo la situación de los mismos al final de cada jornada y controlando las cantidades de items (y, por tanto, las defectuosas obtenidas al final de cada operación); así se elaborará el Informe de Producción diario (Cuadro 9.1).
- *Controlar el desarrollo de las operaciones* en los Centros de Trabajo, estableciendo los tiempos empleados y desperdiciados.

[1] En la literatura anglosajona recibe diversas denominaciones: *Shop-Floor Control*, que es la más utilizada (ver, por ejemplo, Vollmann-Berry-Whybark (1991, págs.183 y ss.), Adam-Ebert (1992, pág. 412), Aquilano-Chase (1991, pág. 531) o Vollmann y otros (1988, págs. 160 y ss.), *Shop-Floor Planning and Control* (Gaither, 1992, págs. 498 y ss.) o *Production Activity Control* (por ejemplo: Aquilano-Chase (1991, pág. 531) o Dilworth (1993, pág. 315)).

- *Controlar la capacidad de cada CT*, mediante la comparación de la carga y capacidad planificadas con las reales, estableciendo la evolución prevista de la cola de espera y las medidas de ajuste de capacidad necesarias a muy corto plazo para mantenerla en los niveles deseados.
- *Proporcionar realimentación* al Sistema de Planificación y Control de Capacidad (al objeto de ajustar la eficiencia y utilización de los CT, su capacidad disponible, los factores de defectuosas de las operaciones, los tiempos de carga, etc), así como a los niveles superiores de Planificación de la Producción.

Los *objetivos a lograr* podrán variar de una empresa a otra, pero, como expresa Dilworth (1993, pág. 303), «existen dos metas que resumen los criterios de muchas compañías»: *nivel de servicio* (ligado al cumplimiento del PMP) y *costes mínimos* (relacionado con la obtención de la mayor eficiencia). Esto último implicará:

- *Mantener el menor volumen de inventarios posible*, tanto de items finales y componentes como de trabajo en curso, evitando los aumentos en las colas de espera.
- *Emplear la menor cantidad de recursos posible*, minimizando los tiempos ociosos de las instalaciones en espera de la llegada de pedidos y los tiempos de preparación entre operaciones, debiendo utilizar, para cada una de ellas, la instalación más eficiente posible.

Estamos, pues, ante un conjunto de funciones harto complejo, que vamos a intentar analizar a lo largo del presente capítulo. Dado que el uso de las informaciones aquí generadas para los otros niveles de la Planificación y Control de la Producción y de la Capacidad, ya han sido comentados en los temas anteriores, consideramos que el proceso de retroalimentación ha quedado ya suficientemente expuesto. Por ello, nos referiremos, en primer lugar, a la revisión y autorización de los pedidos a emitir, pasando luego a estudiar la programación de operaciones (con sus implicaciones en las diferentes configuraciones industriales) y las técnicas más empleadas en las diferentes fases de su desarrollo. Seguidamente nos referiremos al Control de Capacidad para, por último, realizar una serie de precisiones sobre el caso de los servicios y sobre el Diseño del Sistema de Planificación y Control a muy corto plazo.

9.2. EL PROCESO DE REVISION Y AUTORIZACION DE PEDIDOS

Una vez que, de acuerdo con el Plan de Materiales (o el PMP si no existe el anterior), se ha comprobado la llegada de la fecha de emisión de un pedido, se lleva a cabo el proceso de **revisión y autorización**, el cual pretende comprobar si puede procederse realmente a la citada emisión, en función de:

- La disponibilidad de los materiales necesarios para la elaboración del pedido. Si ésta no se da, la emisión no será procedente.
- La disponibilidad de capacidad en el correspondiente Centro de Trabajo. El Informe de Producción (ver Cuadro 9.1) proporcionará la información sobre la situación actual de los CT, sirviendo de base para proceder o no a la **autorización**.

Cuadro 9.1. Aspectos fundamentales del Informe de Producción

El informe de producción contiene la información sobre el desarrollo de los acontecimientos en los Centros de Trabajo y sobre la situación actual en los mismos, lo cual es fundamental para la Programación de Operaciones y el Control de Capacidad. Aunque, por motivos de espacio, no podemos tratarlo a fondo, consideramos necesario realizar una serie de precisiones al respecto. Las informaciones que debe recoger dicho informe son muchas y variadas, dependiendo del grado de control que la empresa necesite, pero, en términos generales, podrían resumirse en la evolución de cualquier pedido emitido al taller:

- Recepción del pedido en el CT y asignación a uno o varios operarios.
- Comienzo de realización de las operaciones.
- Movimiento entre operaciones.
- Desarrollo de las operaciones (situación al final del día, repeticiones que han sido necesarias, piezas desperdiciadas, etc).
- Finalización de la operación.
- Recepción en inventario.

Con dichos datos se puede determinar el trabajo realizado por cada operario (para nóminas), los tiempos utilizados por los operarios (factor de eficiencia), los pedidos que esperan en cada CT (cola), tiempo entre operaciones (desplazamientos), tiempos empleados por unidad de producto, tiempos entre la terminación de la última operación y su entrega en almacén (espera), etc.

La recolección de los datos dependerá mucho de diversas circunstancias, tales como: tipo de las operaciones (fabricación o montaje), longitud de los TS, tamaño de los lotes, volumen de operaciones de los CT, etc. Dependiendo de estas circunstancias y del grado de control necesario, cada empresa podrá elegir la forma y momento de la recogida de la información. Los *criterios más utilizados en la determinación del momento* son cuatro:

- Registrar la información operación por operación, lo cual implica desarrollar un amplio trabajo administrativo.
- Establecer un punto de control en el proceso y recoger la información de todo lo sucedido cuando llegue el pedido a ese punto de control. Es un método adecuado para seguir todas las operaciones cuando el volumen de producción es alto.
- Informar sólo cuando se produce una demora en el desarrollo de las operaciones.
- Informar del pedido considerándolo como un todo (comienzo y fin del pedido). Es muy adecuada cuando se trata de operaciones de montaje, donde el flujo es muy rápido y el TS corto.

Determinado el momento de recogida habrá de elegirse *la forma de rastrear y recoger los datos*. En este sentido, ha habido una evolución lógica que permite la utilización de terminales de ordenador en estaciones o centros de trabajo. También pueden emplearse sistemas menos sofisticados (por ejemplo: un anotador, un informador por CT, un centro de control en cada CT, etc).

Sin duda, el método más completo es la utilización de terminales *on-line*. Estos permiten la actualización inmediata de ficheros y la corrección inmediata de errores, así como las consultas necesarias. De otro lado, permite la utilización de lectoras de caracteres en la recogida de datos (por ejemplo, en la salida de items de almacén). En este sentido, la utilización de los códigos de barras ha supuesto un gran paso, permitiendo la lectura rápida de datos, como números de parte o pasos de procesos. Esto reduce la cantidad de trabajo administrativo y el volumen de papel, pero también implica un coste importante.

Por último, comentar que, como en todo Sistema de Información, es fundamental la disciplina. En definitiva, el informe de producción no podrá ser útil si todos los implicados en la recogida y elaboración de datos no se atienen al procedimiento fijado o, lo que es igual, no recogen y comunican la información en el momento exacto y con la precisión necesaria.

En el caso de que no se diera alguna de las condiciones anteriores, el planificador deberá informar oportunamente de la necesidad de medidas de ajuste, urgiendo la consecución de los materiales o tomando alguna medida para la reducción de Colas de Espera (por ejemplo: horas extras).

Una vez pasado el proceso de revisión, y concedida la autorización, se procedería a la **confección del pedido**, que contendrá toda la información precisa sobre el mismo: ítem y cantidad, ruta que ha de seguir, materiales a obtener de almacén, hojas de finalización de operaciones (a cumplimentar tras cada una de ellas), etc.

Seguidamente, el **pedido sería emitido**, retirándose del almacén los materiales a emplear y trasladándolos al Centro de Trabajo por donde ha de pasar en primer

lugar. El **pedido** pasaría a considerarse **en curso** de fabricación, permaneciendo como tal hasta el momento en que se finalice y se recepcione en almacén tras la preceptiva inspección.

9.3. INTRODUCCION A LA PROGRAMACION DE OPERACIONES

El conjunto de pedidos en curso de fabricación y los pedidos planificados, cuyas fechas de emisión estén incluidas en el Horizonte de Planificación (HP) ahora considerado, serán objeto de la *Programación de Operaciones*. Esta función tiene por objeto *determinar qué operaciones se van a realizar sobre los distintos pedidos, durante cada momento del HP, en cada Centro de Trabajo, de forma que, con la capacidad disponible en cada uno de ellos, se cumplan las fechas de entrega planificadas, empleando el menor volumen de recursos e inventarios posible*. En cuanto al Horizonte de Planificación, éste dependerá de las características del proceso productivo y su entorno, pudiendo variar entre unas horas y varias semanas. Como veremos a continuación, las implicaciones que el desarrollo de esta función conlleva van a variar notablemente en función del tipo de configuración productiva del caso considerado (ver J. A. D. Machuca y otros (1994, Capítulos 5 y 9)).

El caso específico de la **configuración por proyecto** se trata en el Capítulo 10 y a él nos remitimos. Por lo que respecta a las empresas que trabajan en **configuración continua**, la programación cobra su forma más elemental. En estas firmas suele fabricarse para inventario, empleando siempre las mismas instalaciones para obtener el mismo producto, con una disposición de las máquinas en cadena. La operación que realiza cada máquina es siempre la misma y no ha de ser determinada. El aprovechamiento adecuado de la instalación, y de los restantes recursos, vendrá dado por la calidad del diseño del proceso que en su día se efectuó (diseño de las operaciones, adecuada tecnología, equilibrado de la cadena, etc.) (Ibídem, Capítulos 6 y 9). Si éste es adecuado, el inventario de producción en proceso ya es el mínimo posible. Las únicas actividades de programación a desarrollar aquí serían las encaminadas a ajustar el ritmo de producción (caso de que éste pudiera variarse) y/o, en caso de que la actividad se interrumpa al final de la jornada, el número de horas de funcionamiento de la cadena; ambas marcarían el volumen de salida de producto para alcanzar las cantidades fijadas en el Programa Maestro o en el Plan Agregado.

Una situación muy diferente se plantea en las empresas que adoptan una **configuración por lotes**, en la que un Centro de Trabajo es empleado para obtener diferentes pedidos de distintos artículos. Ello implica que, tras obtener un cierto lote, se parará el CT y se preparará para la producción del siguiente. No obstante, podemos encontrarnos con dos situaciones en función de las características de los procesos, las cuales comentaremos seguidamente.

En primer lugar, está el caso de las empresas que usan **distribuciones en línea** para fabricar pocos productos en **lotes homogéneos de gran tamaño**, trabajando, en general, para inventarios. Para el desarrollo de las sucesivas operaciones, los diferentes elementos fabricados en un CT tienen la misma secuencia de paso por las máquinas que lo integran, aunque podría saltar alguna que no fuera necesaria. En este caso, y dado que el tamaño de los lotes a obtener y su fecha de entrega vienen dados por el Plan de Materiales o el Programa Maestro, la actividad a desarrollar en cada momento por todos los equipos del CT viene dada por el orden de entrada de los pedidos en la primera máquina. Este vendrá marcado por unas prioridades determinadas, las cuales indicarán la secuencia de paso de los

lotes de los distintos pedidos; de ésta dependerá el número de pedidos completados a tiempo, los costes de preparación, el valor de los tiempos de suministro, el volumen de inventarios, etc.

En segundo lugar, tenemos el caso de las empresas que, **fabricando bajo pedido**, usan **distribuciones por funciones** para obtener lotes de pequeño tamaño de una gran variedad de productos y componentes, de forma que las máquinas se agrupan en los CT en base a la función que desarrollan. Los lotes de los distintos artículos van de un centro a otro para sufrir las diferentes operaciones, pudiendo ser distintas las secuencias de paso de cada uno de ellos por los CT. Además, la obtención de cada lote puede diferir notablemente en términos de materiales necesarios, tiempo de procesamiento en cada CT, necesidades de preparación, etc. A este tipo de configuración se le suele denominar **Job-Shop**. Si la ruta de obtención de los distintos items es fija, el problema se centrará, como en el caso anterior, en la determinación de la secuencia de paso de los pedidos, aunque ahora habrá que determinarla para cada equipo, complicándose notablemente el problema. Si, por el contrario, algunos items tienen rutas alternativas, de forma que una operación puede realizarse en varios equipos diferentes, será necesario proceder a una **asignación** concreta antes de establecer la secuencia de paso.

En el caso más complejo nos encontramos, pues, con tres actividades a realizar para obtener el Programa de Operaciones:

- **Carga de Talleres**[2], **Asignación, Carga de Máquinas** o, simplemente, **Carga**[3]: asignación de los pedidos a los Centros de Trabajo, indicando qué operaciones se realizarán en cada uno de ellos.
- **Secuenciación**: establecimiento de la prioridad de paso de los pedidos en lo diferentes CT para cumplir las fechas de entrega planificadas con la menor cantidad de inventarios y recursos. Ello será siempre el objeto de esta fase en cualquier tipo de configuración, cambiando sólo la forma de establecer las prioridades, como podremos apreciar en los próximos apartados.
- **Programación Detallada**: determinación de los momentos de comienzo y fin de las actividades de cada CT, así como de las operaciones de cada pedido para la secuenciación realizada.

9.4. LA ASIGNACION DE CARGA A TALLERES

Normalmente, si una operación puede ser realizada en distintas máquinas o en diferentes CT, el tiempo necesario para ejecutarla variará con el CT que la lleve a cabo. Por ello, la asignación de pedidos suele hacerse de forma que el tiempo total empleado sea el menor posible; los tiempos de carga totales de cada pedido en cada CT serían el elemento de referencia a considerar, teniendo como objetivo minimizar su suma. Esto se hace suponiendo que ello traerá consigo el menor coste, lo cual implica asumir que el coste por hora estándar de cada CT es exactamente el mismo. También implica considerar que el porcentaje de defectuosas, los desperdicios, etc., no varían con el CT. Es evidente que esto no tiene por

[2] Del término anglosajón *Shop Loading*, que es el más empleado por los autores norteamericanos (ver, por ejemplo, Heizer-Render (1991, pág. 653), o Dilworth (1993, pág. 314)).

[3] De los términos anglosajones *Assignment*, *Machine Loading* y *Loading*, empleado también por algunos autores norteamericanos (ver, por ejemplo, Adam-Ebert (1992, pág. 416), Gaither (1992, pág. 514) o Stevenson (1990, pág. 656)).

qué ser cierto, por lo que, si los costes de una operación varían con el Centro de Trabajo, el elemento que serviría de referencia sería el coste total de cada pedido en cada uno de ellos, siendo su suma la que habría que minimizar. Todo ello ha de realizarse, además, bajo la consideración de la existencia de una cierta capacidad disponible en cada CT, aunque no se tendrá en cuenta el orden de procesamiento de los pedidos en los distintos equipos. Las técnicas empleadas para realizar esta actividad son diversas; seguidamente pasamos a analizar algunas de ellas.

9.4.1. Aproximaciones de prueba y error: Gráficos de Carga

En este caso se trata de ir probando diversas soluciones posibles, viendo los tiempos o costes que generan y la capacidad que requieren, e intentando llegar a una solución factible con el menor coste o tiempo. Para ello se podría actuar de una forma similar a la siguiente: en función del objetivo perseguido (menor tiempo o menor coste), se comenzaría asignando cada uno de los trabajos al centro que menor tiempo o coste requiera para su elaboración[4]. Esta sería, sin duda, la solución óptima, pero sería necesario comprobar si es o no factible. Para ello, se calcularía la carga generada en cada centro para elaborar los trabajos asignados y, seguidamente, se compararía con la capacidad disponible de éstos para el período considerado, determinando las sobrecargas y subcargas generadas. A continuación se plantearían reasignaciones de los trabajos desde los CT sobrecargados a otros con capacidad ociosa, intentando mover siempre aquél que menor incremento de tiempo o coste genere. Lógicamente, el CT receptor debe tener una subcarga suficiente para que se le asigne el trabajo. Normalmente, la realización de la propuesta inicial, así como la de las sucesivas mejoras, se suele apoyar en la utilización de un gráfico de carga, en el cual se coloca en abscisas el tiempo, y en ordenadas los diferentes Centros de Trabajo[5].

EJEMPLO 9.1. Empleo de gráficos de carga

Una empresa ha de realizar en cierto período de tiempo cinco pedidos, que pueden ser elaborados en tres Centros de Trabajo, con diferentes tiempos (t_{ij}) y costes de obtención (C_{ij}) por unidad de ítem. Los datos correspondientes aparecen en la Tabla 9.1 junto con el coste total (C_t) y el tiempo de carga total (T_t) necesarios para desarrollar cada pedido en cada CT[6]. En los pedidos P1 a P4, la mejor instalación, desde el punto de vista del coste, coincide con la mejor desde el punto de vista del tiempo, no ocurriendo lo mismo para P5.

Para la obtención de la solución inicial, y suponiendo que se pretende obtener el coste mínimo, se asignaría cada pedido al CT en el que tenga menor coste total. Gráficamente, iríamos acumulando las h.e. de carga generadas por cada pedido dentro de cada CT (ver Figura 9.1). Las líneas gruesas verticales muestran la capacidad máxima en cada CT. Las zonas situadas a su derecha muestran la sobrecarga en cada CT (10 h.e. en el CT1 y 20 en el CT3), mientras que la zona de trazo discontinuo indica los recursos ociosos de un CT. El coste total vendría dado por la suma de los correspondientes costes, es decir, 490 u.m. (160 + 80 + 100 + 80 + 70).

Sin embargo, dicha solución no es factible. Para eliminar la sobrecarga tendríamos que proponer una solución alternativa, intentando generar el menor incremento de coste posible. Por ejemplo: podemos eliminar la

[4] El orden de realización de los pedidos dentro de cada CT es indiferente en este punto.

[5] Estos gráficos son similares al de Gantt, que analizaremos más adelante, pero más simplificados, pues aquí no se programan los comienzos y finalizaciones de cada uno de los pedidos.

[6] Los tiempos se miden en horas estándar (h.e.).

Tabla 9.1. Pedidos a realizar, datos de costes y tiempos unitarios y totales en los CT (C_u, t_u, C_t, T_t)

Pedidos	Item	Lote	CT1				CT2				CT3			
			C_u	t_u	C_t	T_t	C_u	t_u	C_t	T_t	C_u	t_u	C_t	T_t
P1	120	200	0,8	0,2	160	40	1	0,35	200	70	1,5	0,4	300	80
P2	115	100	1	0,8	100	80	0,8	0,4	80	40	1,1	1,2	110	120
P3	118	100	1,4	1	140	100	1,3	0,8	130	80	1	0,5	100	50
P4	120	100	0,8	0,2	80	20	1	0,3	100	30	1,5	0,4	150	40
P5	102	100	1	0,1	100	10	1,2	0,4	120	40	0,7	0,2	70	20
Capacidad disponible			50				70				50			

correspondiente al CT1 moviendo el P4 al CT2, con lo que pasaría de costar 80 a costar 100 (incremento de coste = 20 u.m). Además, las 20 h.e. de P4 en CT1 se convertirían en 30 en el CT2, aunque hay recursos ociosos suficientes en este último. La sobrecarga del CT3 podría eliminarse moviendo P5 al CT2, lo que supondría un incremento de coste de 50 u.m.; además, esto supondría enviar 40 h.e. al CT2, y éste no tiene capacidad suficiente. En consecuencia, se pasaría el P4 al CT2, con lo que el coste total pasaría a ser de 510 u.m., el CT1 tendría 10 h.e. ociosas y el CT2 tendría su capacidad nivelada. Hecho esto, podría pasarse P5 del CT3 al CT1, con un incremento de coste de 30 u.m., con lo que la capacidad del CT3 quedaría nivelada; dado que la carga de CT1 se incrementaría en 10 h.e., también quedaría nivelada. La solución obtenida (Figura 9.2) es la factible de menor coste (540 u.m.), siempre que se considere, que los trabajos han de asignarse completos a las instalaciones.

En el caso de que los trabajos pudieran dividirse, la cuestión se complicaría notablemente, aunque, en el caso que nos ocupa, se llegaría a la misma solución. Por ejemplo, en la primera reasignación no habríamos movido completo el P4, sino sólo 10 horas de éste para lograr el menor incremento de coste posible; esto representa aumentar en 15 h.e. la carga del CT2, con lo que éste quedaría con 15 horas ociosas y el CT1 quedaría nivelado. Ello no dejaría suficiente capacidad para eliminar la sobrecarga del CT3 moviendo el P5 al CT2. Dada la capacidad disponible, la solución factible de mínimo coste coincidiría, pues, con la obtenida para la Figura 9.2.

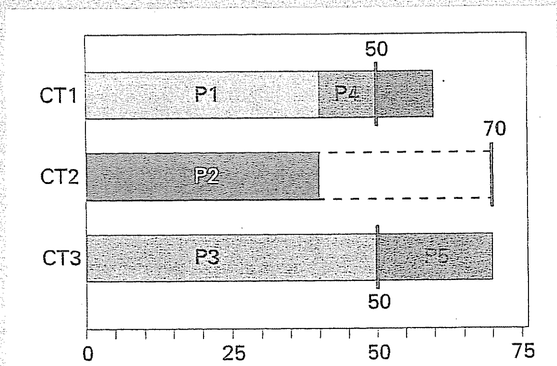


Figura 9.1. Gráfico de Carga de la solución inicial.

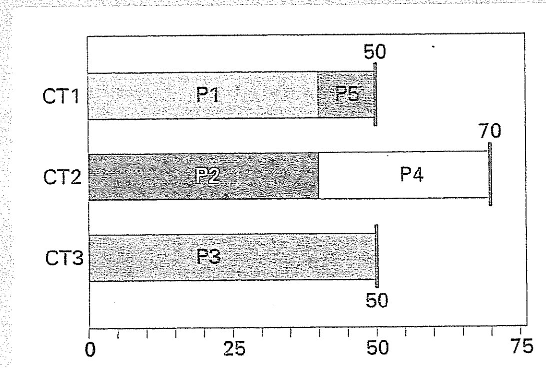


Figura 9.2. Gráfico de Carga de la solución mejorada.

Aun con el apoyo que representa el Gráfico de Carga, es obvio que si el número de CT, operaciones y pedidos aumenta sólo un poco, este procedimiento se vuelve muy complejo, máxime si los pedidos pueden partirse y asignarse a varios centros. Además, nunca sabremos cuán lejos estamos de la solución óptima. No obstante, la claridad y sencillez de este tipo de gráficos hace que sean ampliamente utilizados, dado que reflejan claramente la carga resultante de la asignación o secuenciación realizada.

9.4.2. Métodos optimizadores

Cuando el caso lo permite, la utilización de los modelos basados en programación matemática puede proporcionar una solución teóricamente óptima al problema. El más empleado por los diferentes autores es el Algoritmo de Asignación de Kuhn, que parte de una matriz formada, en nuestro caso, por los costes de realizar cada pedido en cada instalación.

EJEMPLO 9.2. Asignación mediante el método húngaro

En un determinado Centro de Trabajo se desea asignar cinco operaciones O_i, (i = 1, ..., 5) a otras tantas máquinas diferentes, M_j (j = 1, ..., 5), de forma que cada una de ellas se ejecute en una sola máquina, y viceversa. Además, se pretende que los costes totales originados por dicha asignación sean los mínimos posibles. La Tabla 9.2 refleja los costes, c_{ij}, que provocaría la asignación de una determinada operación, O_i, a una cierta máquina, M_j.

Tabla 9.2. Costes de las posibles asignaciones (c_{ij})

O_i \ M_j	M_1	M_2	M_3	M_4	M_5
O_1	35	30	18	11	24
O_2	32	33	21	10	21
O_3	24	31	29	22	11
O_4	9	16	28	35	26
O_5	26	19	17	24	35

El planteamiento matemático de un problema de estas características es un caso particular de programación lineal binaria (ver Machuca, J. A. D., y otros, 1990, págs. 545 y ss). No obstante, existe un algoritmo específico que facilita su resolución, el algoritmo húngaro o de Khun, que, partiendo de una matriz de costes, escoge un elemento, y sólo uno, por fila y por columna, de modo que se minimicen los costes totales. El procedimiento que lleva a conseguir una solución óptima para realizar la asignación se compone de las siguientes fases:

Fase 1. Obtención de ceros

Se comienza el proceso por las columnas de la matriz de la Tabla 9.2. En cada una de ellas se elige el menor coste (por ejemplo: el 9 para la columna M_1) y se resta a todos los elementos de dicha columna. Repitiendo este proceso con cada columna de la matriz de costes, se obtiene la Tabla 9.3, donde los ceros indican los lugares con los menores costes en cada una de ellas. Con la nueva matriz se realiza un procedimiento análogo, pero en las filas, eligiendo el elemento más pequeño de cada una de ellas y restándoselo, posteriormente, al resto de los elementos que la integran. Se obtiene así la Tabla 9.4. Con los cálculos realizados se asegura que en cada fila y en cada columna exista, al menos, un cero, es decir, un punto de menor coste.

Tabla 9.3. Obtención de ceros (I).

	M_1	M_2	M_3	M_4	M_5
O_1	26	14	1	1	13
O_2	23	17	4	0	10
O_3	15	15	12	12	0
O_4	0	0	11	25	15
O_5	17	3	0	14	24

Tabla 9.4. Obtención de ceros (II).

	M_1	M_2	M_3	M_4	M_5
O_1	25	13	0	0	12
O_2	23	17	4	0	10
O_3	15	15	12	12	0
O_4	0	0	11	25	15
O_5	17	3	0	14	24

Fase 2. Búsqueda de la solución óptima

Es evidente que si se pudiese realizar una asignación biunívoca con los lugares ocupados por los ceros en la Tabla 9.4, que relacionase a cada O_i con una sola M_j y viceversa, ésta sería la solución óptima. Para comprobar si se da esta relación, debemos seguir los pasos que describimos a continuación. En la Tabla 9.4 se toma la fila con menor número de ceros (si hay más de una se escoge una cualquiera), se encuadra uno de ellos y se tachan los restantes que existen en la fila y columna del encuadrado. Se continúa este proceso con las demás filas (de menor a mayor número de ceros) hasta que todos los ceros de la tabla estén enmarcados o tachados.

En esta fase, el enmarcado de un cero equivale a escoger su casilla para una asignación; por ello, es lógico comenzar por las de menor número de ceros, ya que son las que tienen menores posibilidades de asignaciones válidas. Una vez enmarcado un cero en una posición (*ij*), no podrá existir ninguna otra asignación en su fila y en su columna, ya que la correspondencia O_i-M_j debe ser biunívoca, por lo que se tachan (se eliminan) el resto de los ceros existente en aquéllas. En el ejemplo que estamos desarrollando, se ha empezado el proceso descrito por la fila O_3, continuando por la O_2, O_5 y O_4, hasta obtener la Tabla 9.5, en la que O_1 y M_2 aún no tienen asignación. Pasamos, por tanto, a la siguiente fase.

Tabla 9.5. Enmarcado de ceros.

	M_1	M_2	M_3	M_4	M_5
O_1	25	13	~~0~~	~~0~~	12
O_2	23	17	4	[0]	10
O_3	15	15	12	12	[0]
O_4	[0]	~~0~~	11	25	15
O_5	17	3	[0]	14	24

Fase 3. Obtención de un conjunto mínimo de filas y columnas que contienen todos los ceros

Para realizar las asignaciones que faltan (en nuestro caso sólo una) debe operarse de la siguiente forma (comprobar los siguientes pasos observando las Tablas 9.5 y 9.6):

a) Se marca con una cruz toda fila que no contenga un cero encuadrado (aquí sólo la O_1).

b) Se marca cada columna que tenga algún cero tachado en una fila marcada (en nuestro caso, M_3 y M_4).

c) Se marca toda fila con un cero enmarcado en una columna marcada (O_2 y O_5).

d) Se repiten los pasos *b* y *c* hasta que no sea posible marcar ninguna nueva línea (ese es nuestro caso); en ese momento se realiza el siguiente paso (*e*).

e) Trazar una raya sobre las filas no marcadas y sobre las columnas marcadas.

Con la realización de los pasos anteriores hemos conseguido que la líneas rayadas de la Tabla 9.6 contengan todos los ceros, o, lo que es lo mismo, todas las asignaciones posibles en el momento actual.

Tabla 9.6. Asignaciones posibles.

	M_1	M_2	M_3	M_4	M_5	
O_1	25	13	~~0~~	~~0~~	12	X
O_2	23	17	4	[0]	10	X
O_3	15	15	12	12	[0]	
O_4	[0]	~~0~~	11	25	15	
O_5	17	3	[0]	14	24	X
			X	X		

Fase 4. Desplazamiento de algunos ceros

Las asignaciones que faltan deben estar en los elementos no tachados de la tabla y, dentro de ellos, habrá que elegir el de menor coste con objeto de transformarlo en un cero. Para conseguirlo, en la tabla parcial, formada por los elementos no atravesados por ninguna línea, se resta de cada uno el menor de ellos; a continuación se suma dicho número a los elementos situados en la intersección de dos líneas. Siguiendo dichas instrucciones, y teniendo presente que el menor de los elementos no rayados es el 3 (casilla O_5-M_2), se llega a la Tabla 9.7. Sobre ella se pasa de nuevo a la fase 2 y, si ello revela que se ha llegado a la solución óptima, el proceso habrá terminado; en caso contrario, éste continuará iterativamente hasta conseguirla.

Tabla 9.7. Obtención de ceros (III)

	M_1	M_2	M_3	M_4	M_5
O_1	22	10	10	0	9
O_2	20	14	4	0	7
O_3	15	15	15	15	0
O_4	0	0	14	28	15
O_5	14	0	0	14	21

En nuestro caso (ver Tabla 9.8) se han ido enmarcando ceros con la secuencia siguiente en las filas: O_3, O_2, O_1, O_5 y O_4, llegando con ello a la solución óptima.

Tabla 9.8. Asignación final.

	M_1	M_2	M_3	M_4	M_5
O_1	22	10	[0]	~~0~~	9
O_2	20	14	4	[0]	7
O_3	15	15	15	15	[0]
O_4	[0]	~~0~~	14	28	15
O_5	14	[0]	~~0~~	14	21

Para calcular el coste de la solución obtenida, CT, se suman los costes correspondientes a las asignaciones elegidas, tomándolos de la Tabla 9.2: CT = 18 + 10 + + 11 + 9 + 19 = 67 u.m.

Cuando exista una **asignación imposible** y un pedido no pueda ser ejecutado en una instalación, se supondrá en la casilla correspondiente un coste M, que tiende a infinito. Ello puede ocurrir cuando un CT no tenga capacidad suficiente o por cualquier otro motivo como, por ejemplo, convertir en cuadrada una matriz que en principio no lo era (ver Machuca J. A. D. y otros, 1990, pág. 552).

En el ejercicio desarrollado se trataba de minimizar costes; si el problema hubiese sido de **maximización** (por ejemplo, a partir de una matriz de rendimientos), puede aplicarse el procedimiento explicado realizando previamente uno de los dos cambios siguientes:

- Cambiar de signo todos los elementos de la matriz de rendimientos.
- Tomar el mayor de los elementos c_{ij} de la matriz de rendimientos (llamémosle C) y sustituir todos los c_{ij} por la diferencia (C-c_{ij}).

Este método presenta algunos inconvenientes que lo hacen excesivamente rígido. Entre ellos cabría destacar, por una parte, que, de los distintos trabajos, sólo uno puede ser asignado a cada CT o instalación. Dado que aquéllos tendrán distinta duración, esto implicará desperdiciar las instalaciones más eficientes si a éstas se asigna un trabajo corto. Además, si hay más trabajos a realizar que Centros, los que excedan del número de éstos se asignarán a alguno de los CT ficticios que se creen, aunque en los reales haya capacidad ociosa. Por otra parte, no se contempla la posibilidad de que los trabajos se puedan subdividir, puesto que la asignación es biunívoca. Una opción para eliminar estos inconvenientes es la utilización del método del transporte o la de modelos particularizados de programación lineal (ver Anexo a Parte I).

9.4.3. Soluciones heurísticas: El método de los índices

De entre los métodos heurísticos para afrontar el problema de la Carga de Talleres, es sin duda el de los índices el más extendido. Este método es una formalización de los criterios que antes empleamos con el Gráfico de Carga. Se comienza estableciendo una solución óptima inicial sin considerar las disponibilidades de capacidad; posteriormente se van eliminando las sobrecargas mediante la consideración de un tiempo o coste de oportunidad (incremento de tiempo o de coste), derivado de mover un trabajo desde el centro con sobrecarga, donde está actualmente asignado, hacia otro en que exista capacidad ociosa. Se habrá llegado a la solución cuando ya no queden centros sobrecargados. La expresión de dicho tiempo o coste de oportunidad va a ser el Indice de Tiempo (I_t) y el Indice de Coste (I_c), los cuales se determinan para cada pedido en cada uno de los CT. Aunque la forma de determinar estos índices puede variar, ello no afecta excesivamente al método[7]. Al ser heurístico, este procedimiento no garantiza la consecución de una solución óptima, pero sí satisfactoria y, en muchos casos, cercana al óptimo. De hecho, existen estudios ya clásicos, que ponen de manifiesto los buenos resultados que ha proporcionado en la práctica[8].

[7] Por nuestra parte, en el Ejemplo 9.3, vamos a seguir la opción propuesta por Starr (1989, página 565 y ss.).

[8] Ver, por ejemplo, Ferguson-Sargent (1958, págs. 149 y ss.), citado en Starr (1989, pág. 565).

EJEMPLO 9.3. Asignación con el método de los índices

El índice a aplicar se determina para cada pedido por separado. Así, para un pedido, *Pi*, el índice de tiempos en el *CTK* (I_{tik}), vendrá dado por la expresión: (T_{tik} - T_{timin})/(T_{timin}), siendo T_{timin} el menor tiempo de elaboración de *Pi*, de entre los que serían necesarios en las diferentes instalaciones. El índice de costes en el *CTK* (I_{cik}), vendrá dado por la expresión: (C_{tik} - C_{timin}) / (C_{timin}), siendo C_{timin} el menor coste total de elaboración de *Pi* en las diferentes instalaciones.

Tomando el caso del Ejemplo 9.1, la Tabla 9.9 muestra los costes y tiempos totales, así como los respectivos índices de los distintos *Pi* en los CT_k. Se han resaltado los T_{timin} y C_{timin}. Los índices de los pedidos *i* en un *CTK* dan una idea de la penalización que representaría, en términos de coste (o tiempo), asignar el pedido al *CTK* en vez de a aquel CT de coste (o tiempo) mínimo. Efectivamente, expresan, en tanto por uno, el incremento de coste (o tiempo) que se produciría al mover *Pi* desde el CT donde se da el coste (o tiempo) mínimo, hasta el *CTK* correspondiente. Cuanto mayor sea el índice de un pedido *i* en un *CTK*, menos interesará realizarlo allí. Como es lógico, pues, en la solución de partida cada pedido se asigna al CT con índice cero, sin considerar la capacidad disponible. Como ocurría en el Ejemplo 9.1, sólo en el P_5 la mejor asignación por tiempo (CT1) no coincide con la de costes (CT3). La Tabla 9.10 muestra esta primera asignación de cargas utilizando índices de costes.

Las desviaciones positivas indican que la carga asignada es superior a la capacidad disponible y que, por tanto, existe sobrecarga. Las desviaciones negativas indican la existencia de capacidad ociosa en el CT.

A partir de aquí, se tratará de eliminar las sobrecargas con el menor incremento de coste posible. La regla a seguir sería *elegir, de entre los trabajos asignados a CT sobrecargados, aquel que presente menor índice de coste en un CT con capacidad ociosa.* En nuestro caso, los pedidos asignados al CT1 y al CT3, son P1, P3, P4 y P5; los índices de coste que presentan cada uno en el CT2, que es el único con capacidad ociosa, son 0,25, 0,3, 0,25 y 0,71; los menores valores son 0,25 de P1 y 0,25 de P4, ambos en el CT2, por lo que sería indiferente elegir uno u otro. Optamos por P4. Al correspondiente *CTK* (CT2 en nuestro caso), se enviará la menor de estas tres cantidades:

- Parte del trabajo elegido (P4) que sea necesario mover para eliminar la sobrecarga en el CT sobrecargado (10 h.e. en nuestro caso).
- Total de carga generada por el pedido elegido que se va a mover en el CT en que se encuentra (CT1: 20 h.e.).
- Total de h.e. del pedido elegido que admite la capacidad ociosa del CT de destino (sobran 30 h.e. del CT2, que equivaldrían a 20 h.e. del P4 en el CT1 (ver Tabla 9.9)).

En nuestro caso, pues, 10 h.e. del P4 en el CT1 pasarán al CT2, en el que supondrán 15 h.e., quedando la segunda asignación como se recoge en la Tabla 9.11, donde se observa que sigue existiendo sobrecarga (20 h.e) en el CT3. Actuando de igual forma, comparamos los índices de P3 y P5 (que son los únicos pedidos asignados al CT3) en el CT2 (único con capacidad ociosa), siendo el menor 0,3 (corresponiente a P3). Podremos pasar sólo 15 h.e. al CT2, que equivalen a 9,38 h.e. del CT3.

Como se desprende de la Tabla 9.12, ya no tenemos capacidad ociosa en ningún CT y, sin embargo, existen 10,62 h.e. de sobrecarga en el CT3. Esto se producirá con una alta probabilidad al utilizar el índice de coste si la capacidad disponible es escasa ya que, con dicho índice, no se tiende a minimizar el tiempo. El uso de los índices de tiempo proporciona más fácilmente una solución factible aunque, normalmente, con coste superior.

Tabla 9.9. Costes y tiempos totales, Indices de Coste y Tiempo de los pedidos en los CTk

CT_k	CT1				CT2				CT3			
P_i	C_t	I_{ci1}	T_t	I_{ti1}	C_t	I_{ci2}	T_t	I_{ti2}	C_t	I_{ci3}	T_t	I_{ti3}
P1	160	0	40	0	200	0,25	70	0,75	300	0,875	80	1
P2	100	0,25	80	1	80	0	40	0	110	0,375	120	2
P3	140	0,4	100	1	130	0,3	80	0,8	100	0	50	0
P4	80	0	20	0	100	0,25	30	0,5	150	0,875	40	1
P5	100	0,43	10	0	120	0,71	40	3	70	0	20	2

Las Tablas 9.13 y 9.14 muestran la solución que se obtendría aplicando el mismo procedimiento, pero a partir de los Indices de Tiempo.

Los costes de ambas opciones son 540 u.m. para el caso de los índices de tiempo y 503,75 u.m. para los índices de costes: 160 (de P1) + 80 (de P2) + [15 × 120/80] y [40,62 × 100/50] (de P3) + [10 × 80/20] y [15 × 100/30] (de P4) + 70 (de P5).

Tabla 9.10. Primera asignación con índices de coste

Pedidos	CT1	CT2	CT3
	Centro de trabajo		
P1	(40)		
P2		40	
P3	⊕		50
P4	(20)		
P5			20
Carga asignada	(60) ⊜	40	70
Capacidad disponible	(50) ⊜ ⊖	70	50
Desviación	(10)	−30	20

Tabla 9.11. Segunda asignación con índices de coste

Pedidos	CT1	CT2	CT3
	Centro de trabajo		
P1	40		
P2		40	
P3			50
P4	10	15	
P5			20
Carga asignada	50	55	70
Capacidad disponible	50	70	50
Desviación	0	−15	20

Tabla 9.12. Tercera asignación con índices de coste

Pedidos	CT1	CT2	CT3
	Centro de trabajo		
P1	40		
P2		40	
P3		15	40,62
P4	10	15	
P5			20
Carga asignada	50	70	60,62
Capacidad disponible	50	70	50
Desviación	0	0	10,62

Tabla 9.13. Primera asignación con índices de tiempo

Pedidos	CT1	CT2	CT3
	Centro de trabajo		
P1	40		
P2		40	
P3			50
P4	20		
P5	10		
Carga asignada	70	40	50
Capacidad disponible	50	70	50
Desviación	20	−30	0

Tabla 9.14. Segunda asignación con índices de tiempo

Pedidos	CT1	CT2	CT3
	Centro de trabajo		
P1	40		
P2		40	
P3			50
P4		30	
P5	10		
Carga asignada	50	70	50
Capacidad disponible	50	70	50
Desviación	0	0	0

9.5. LA SECUENCIACION

Como comentamos anteriormente, el objeto de esta fase es establecer las secuencias de paso de los pedidos por los Centros de Trabajo para cumplir las fechas de entrega con el menor volumen de inventarios y recursos posible. La forma de desarrollarla dependerá del tipo de configuración de que se trate, por lo que existen diferentes opciones.

9.5.1. Fabricación en línea de grandes lotes

Como ya mencionamos anteriormente, se trata de la obtención de grandes lotes de pocos items homogéneos, los cuales tienen una misma secuencia de paso en los equipos de un cierto CT, pudiendo encontrarnos con dos situaciones diferentes. En la primera, las unidades van pasando una a una por cada máquina, sin necesidad de esperar a que cada operación se ejecute sobre el lote completo; una vez la elaboración del lote ha sido concluida, se procederá a la preparación del Centro de Trabajo para la fabricación de un pedido de otro ítem diferente. En estas circunstancias no es necesario determinar el orden de paso por las diferentes máquinas; basta considerar al conjunto de equipos reunidos en el CT, y determinar el orden de entrada en el mismo. Hablaremos, pues, de **secuenciación en una sola máquina o instalación.**

En la segunda, el paso por cada máquina del CT se realiza de forma que hasta que se ejecuta la operación (o conjunto de ellas) sobre todas las unidades del lote, no pasa éste a la siguiente. Por tanto, bastará determinar el orden de entrada de los pedidos en la primera máquina, pero las consecuencias de la secuenciación serán diferentes a las del caso anterior, por lo que los equipos deberán ser considerados de forma separada. Se tratará, pues, de **secuenciación en varias máquinas.**

9.5.1.1 *Secuenciación en una sola máquina o instalación*

a) Con consideración de tiempos de preparación

En este caso, el establecimiento de las prioridades de procesamiento de N pedidos en una cierta instalación se realizará haciendo mínimo el tiempo de preparación total empleado por los mismos[9] y, por tanto, el tiempo total de procesamiento. Este problema puede ser representado por una matriz cuadrada, $N \times N$, en la que cada elemento C_{ij} representaría, para una instalación concreta, el tiempo o el coste de preparación de la instalación, necesario para procesar el pedido del ítem j tras haber procesado el del ítem i (ver Ejemplo 9.4).

En cuanto a las **técnicas a emplear**, puede usarse el Algoritmo Húngaro o de Asignación (ver Apartado 9.4.2), colocando un coste M tendente a infinito en la diagonal con objeto de hacer imposible la asignación correspondiente; no obstante, la secuencia resultante de la asignación podría dejar sin establecer la ordenación entre algunos items o pedidos. Otro algoritmo, muy conocido por su sencillez, es el de Kauffmann (1972), que se ilustra en el Ejemplo 9.4. Este y otros modelos, tanto optimizadores como heurísticos, son descritos por Díez (1982).

[9] El tiempo de ejecución de cada pedido es independiente del orden en que se elabore y, por ello, no se hace intervenir en la minimización.

EJEMPLO 9.4. Secuenciación con el algoritmo de Kauffman

Supongamos que se trata de ordenar cuatro pedidos cuya matriz de tiempos de preparación aparece en la Tabla 9.15. A partir de ella, los pasos son los siguientes:

Tabla 9.15. Matriz de tiempos inicial

i \ j	1	2	3	4
1	-	[4]	8	6
2	6	-	10	(2)
3	10	6	-	8
4	8	12	10	-

Tabla 9.16. Segunda Matriz

i \ j	1	2	3	4
1				
2		-	10	[2]
3		6	-	8
4		12	10	-

a) Se selecciona arbitrariamente un pedido i como inicial (por ejemplo: $i = 1$).

b) En la fila de dicho pedido se elige aquel cuyo comienzo implique el menor tiempo de preparación. En nuestro caso es el 2, con cuatro horas, que sería el segundo pedido a realizar.

c) Elegido el segundo pedido, se eliminan de la matriz la fila y columna correspondiente al primero (Tabla 9.16).

d) Partimos ahora del segundo pedido de la secuencia (P2) y se repiten los pasos b y c iterativamente hasta haber realizado la secuenciación completa. De acuerdo con ello, el pedido elegido a continuación es el 4. Hecho esto se eliminarían la fila 2 y la columna 2 y se partiría de P4, pero aquí no es necesario, pues sólo queda P3 por colocar en la secuencia, que queda de la siguiente forma: 1 - 2 - 4 - 3, con un tiempo de preparación total igual a 16 horas (4 + 2 + 10).

Este tipo de técnicas parte de la hipótesis de que es indiferente la fecha de conclusión de cada lote y, por tanto, la solución obtenida no tiene en cuenta este aspecto; esto no supone un problema si todos los lotes han de ser concluidos dentro del mismo período de tiempo, pero sí cuando las fechas de entrega planificadas sean diferentes y la ordenación resultante pueda hacer que se incumplan.

b) Sin considerar tiempos de preparación

Cuando lo fundamental es el cumplimiento de las fechas de entrega planificadas para los pedidos y/o cuando la variación de los tiempos de preparación en los CT, en función del ítem previamente procesado, es pequeña en comparación con el tiempo total de procesamiento, la resolución del problema debe poner su énfasis en la terminación a tiempo de los pedidos. El método más utilizado en la práctica es el de las **Reglas de Prioridad**, técnica heurística consistente en el establecimiento de una regla basada en un ratio, que es un indicador numérico del objetivo fundamental a lograr en la secuenciación. Se puede emplear siempre que el objetivo a lograr sea único o si, existiendo varios, uno de ellos es prioritario y no existe otro método para contemplarlos simultáneamente. En base al ratio elegido se selecciona el primer trabajo a realizar en el CT; una vez se aproxime su finalización, se determina el próximo a realizar, y así sucesivamente (ver Ejemplos 9.5 y 9.6).

Dado que el problema que tratamos en este punto se refiere, en la mayoría de los casos, a firmas que trabajan para inventario, vamos a centrarnos aquí en las Reglas de Prioridad más empleadas por empresas que siguen un enfoque clásico a la hora de dimensionar los lotes en el Programa Maestro de Producción (ver

Capítulo 13)[10]. Se tratará, pues, de lograr el mayor nivel de servicio o, lo que es igual, evitar en lo posible las rupturas, para lo cual se ejecutará antes el lote correspondiente al ítem cuyo stock esté más cerca del agotamiento.

Las reglas más empleadas son el **ROT** (*Run Out Time*) o **Tiempo de Agotamiento**, medido como cociente entre el inventario restante de un ítem y la demanda media por período, y el **Ratio Crítico**[11], o cociente entre el tiempo que resta para que se agote el inventario de un ítem y el trabajo restante para acabar el pedido correspondiente. La primera indica el número de unidades de tiempo que faltan para que el stock disponible del ítem se agote (supuesto siempre que su consumo se ajustará a la demanda media por período). Lógicamente, para evitar la ruptura del stock, se emitirá antes el pedido que tenga menor ROT. Cuando los tiempos necesarios para la obtención de los lotes a secuenciar varían mucho, el ROT plantea un claro problema, pues no considera el tiempo que falta para acabar el pedido del ítem en cuestión. Este aspecto es tenido en cuenta por el Ratio Crítico; dada su formulación, un valor del mismo inferior a uno indica que el stock va a agotarse antes de que pueda obtenerse el lote en cuestión, por lo que sería necesario acudir a medidas de ajuste que eviten la ruptura. Valores superiores a uno implicarían que hay tiempo suficiente. En cualquier caso, se elegiría el de menor valor. Los Ejemplos 9.5 y 9.6 ilustran el empleo de ambas reglas.

EJEMPLO 9.5. Empleo de la regla ROT

Supongamos que se trata de cuatro pedidos que han de desarrollarse en un cierto CT. Los datos respecto a los mismos se detallan en la Tabla 9.17, junto con la demanda media diaria e inventario disponible en este momento. Los ROT calculados en la citada tabla muestran que el primer pedido a procesar es el 1015, pues es el que presenta el valor más pequeño.

Tabla 9.17. Determinación del ROT

Pedido	Item	Lote	Inventario restante	Demanda/día	ROT
1010	I1	100	40 u.	8 u.	5 días
1015	I2	100	30 u.	10 u.	3 días
1017	I3	150	60 u.	10 u.	6 días
1019	I4	50	25 u.	3 u.	8,3 días

Una vez cercana la conclusión del lote seleccionado, se volverá a calcular el ROT para los lotes que quedaron, así como para los nuevos emitidos desde la anterior ordenación. A partir de los valores obtenidos, se elegirá el próximo a procesar, el cual no tiene por qué coincidir con el que en la Tabla 9.17 aparecía en segundo lugar (el 1010). Ello es debido a que pueden haberse dado alteraciones de la demanda que hayan hecho reducirse el inventario de los diferentes ítems a un ritmo superior o inferior a su demanda media, que fue la considerada para realizar la ordenación. Es por ello que la secuenciación con reglas de prioridad se realizará siempre poco antes de que el CT vaya a quedar libre, dando origen a un programa de operaciones para un corto horizonte, normalmente de uno o dos días (o, incluso, de varias horas).

[10] Posteriormente analizaremos otras reglas de prioridad que serían aplicables también a este caso, pero cuando se trata de empresas que actúan, por ejemplo, bajo filosofía MRP y parten de un Plan de Materiales.

[11] Ver, por ejemplo, Meredith (1992, pág 507) o Vollmann-Berry-Whybark (1991, pág. 192).

EJEMPLO 9.6. Empleo del Ratio Crítico

Supongamos que, en el caso del ejemplo anterior, el CT tiene una capacidad disponible de 14 h.e./día (dos turnos diarios, que implican 16 h.r./día). Los datos necesarios para llegar al Ratio Crítico aparecen en la Tabla 9.18, referidos a una unidad de cada ítem[12]. De acuerdo con ellos, el trabajo restante (para terminar un pedido) se calcularía como a continuación se indica para el caso del 1010[13].

a) Tiempo de ejecución × número de unidades / Capacidad Disponible = 0,2 × 100/14 = 1,43 días.

b) Tiempo de preparación / Capacidad Disponible = 2/14 = 0,14 días.

c) (Tiempo de inspección + tiempo de desplazamiento) / h.r. de jornada al día = 6/16 = 0,37 días.

d) Trabajo restante = $a + b + c$ = 1,43 + 0,14 + + 0,37 = 1,94 días.

En cuanto al tiempo restante, éste sería el que queda hasta que se agote el inventario, es decir, el ROT calculado en el Ejemplo 9.5. El Ratio Crítico se calcula por el cociente entre ambas.

El primer pedido a procesar es el 1017, por su menor ratio crítico, no coincidiendo con el resultado obtenido con el ROT, pues esta regla no tuvo en cuenta el parámetro «trabajo restante», cuya comparación con el valor de ROT es sumamente importante para evitar la ruptura.

Tabla 9.18. Determinación del Ratio Crítico y comparación con el ROT

Pedido	Item	Cantidad	ROT	Tiempo de ejecución (h.e.)	Tiempo de preparación (h. e.)	Tiempo de inspección (h.r.)	Tiempo de desplazamiento y esperas (h.r.)	Trabajo restante	Ratio crítico
1010	I1	100	5	0,2	2	2	4	1,94	2,58
1015	I2	100	3	0,15	2	2	4	1,58	1,9
1017	I3	150	6	0,35	2	2	4	4,26	1,41
1019	I4	50	8,3	0,4	2	2	4	1,94	4,28

c) *El sistema Kanban*

En entornos *Just In Time*, la planificación y control de los movimientos de items en el taller se desarrolla mediante el sistema Kanban. Dado que fue abordada en el Capítulo 6, nos remitimos al mismo para su estudio.

9.5.1.2. *Secuenciación en varias máquinas*

En este caso, el orden de procesamiento, además de conllevar las mismas implicaciones que en el caso anterior, también puede influir en el tiempo total necesario para el procesamiento de todos los pedidos. Ello es debido a que los tiempos muertos que se generan en las máquinas como consecuencia de estar esperando los sucesivos pedidos dependen de la secuenciación elegida. Este hecho es ilustrado por el Ejemplo 9.7.

[12] Los tiempos de las columnas 6, 7 y 8 se han supuesto iguales para los distintos pedidos, pero podrían ser distintos.

[13] El procedimiento es similar al empleado para obtener el tiempo de suministro (Capítulo 1) o para periodificar las cargas en el método CRP (Capítulo 5), sólo que ahora no se considera el tiempo de cola.

EJEMPLO 9.7. Efecto de la secuenciación de pedidos

Supongamos que deben realizarse los pedidos P1 y P2, pasando ambos por CT1 (en primer lugar) y por CT2 (en segundo lugar). Los tiempos de procesamiento de los P_i en los CTK aparecen en la Tabla 9.19 y las dos posibles opciones de secuenciación aparecen en los gráficos de carga de las Figuras 9.3. y 9.4. En ellas se aprecia cómo la diferencia en el tiempo total de procesamiento se debe al distinto tiempo de ociosidad de CT2 en cada caso.

Tabla 9.19. Tiempos de procesamiento

P_i \ CTk	CT1	CT2
P_1	3	3
P_2	5	2

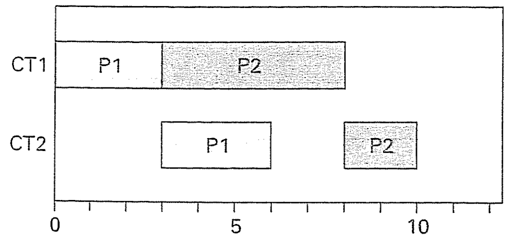


Figura 9.3. Secuenciación 1.

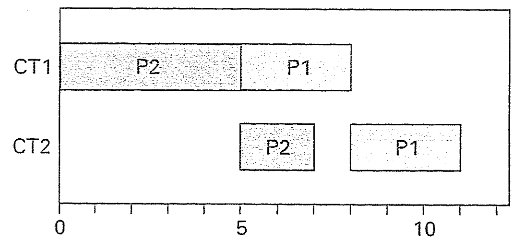


Figura 9.4. Secuenciación 2.

El efecto que hemos observado incide en el aprovechamiento de los recursos (pues el tiempo ocioso depende de la secuenciación), en las fechas de conclusión de los pedidos y en los volúmenes de producción en curso (relacionados con el tiempo total de procesamiento). De acuerdo con ello, se trataría de establecer la secuencia que, cumpliendo las fechas de entrega de los pedidos, implique el menor tiempo total en la obtención de los mismos, existiendo para ello diversas reglas y técnicas.

a) La regla de Johnson para N pedidos y dos máquinas (M1 y M2)

De entre las técnicas existentes para resolver este problema, la más extendida es la regla de Johnson, sin duda por su sencillez y claridad (Johnson, 1954, págs. 61 a 68). Partiendo del tiempo de ejecución de cada pedido en cada máquina, este método heurístico pretende hacer mínimo el tiempo necesario para concluir todos ellos y, por tanto, el tiempo ocioso de las máquinas. El proceso de resolución se ilustra en el Ejemplo 9.8.

EJEMPLO 9.8. Aplicación de la regla de Johnson para *N* pedidos y dos máquinas[14]

Supongamos que tenemos que realizar cinco pedidos, P_i (i = 1, 2, ..., 5), en una instalación compuesta de dos máquinas (M_1 y M_2), de acuerdo con los tiempos de la Tabla 9.20 (en h.e.).

Tabla 9.20. Tiempos de ejecución

	P_1	P_2	P_3	P_4	P_5
M_1	5	1	9	3	10
M_2	2	6	7	8	4

[14] Adaptado de E. Díez (1980, pág. 63).

Resolución

Básicamente, la regla de Johnson procesa primero los pedidos cuyo tiempo de ejecución en la máquina M_1 es menor que el necesario en la máquina M_2, ejecutando posteriormente aquellos pedidos para los que sucede lo contrario. El método concreto para determinar la secuenciación consta de las siguientes fases, que se repetirán hasta que no exista ningún pedido por secuenciar:

Fase 1. De entre todos los pedidos, P_i, se escoge aquel que posea el menor tiempo de toda la tabla, independientemente de si este tiempo pertenece a la máquina M_1 o M_2. Caso de haber dos o más tiempos iguales, se elige cualquiera de ellos.

Fase 2. Si el tiempo elegido pertenece a una operación a realizar en la máquina M_1, el pedido P_i elegido en el paso anterior debe programarse delante de todos los que resten. Por el contrario, si el tiempo fuese de la máquina M_2, P_i deberá ser programado detrás de todos los que aún figuren en la tabla para asignar.

Fase 3. Suprimir de la lista de pedidos pendientes el seleccionado en los pasos anteriores. Repetir las dos primeras fases hasta que se logre una secuencia que los incluya a todos.

Aplicando las fases anteriores a nuestro caso tendremos lo siguiente:

Iteración 1:

El menor tiempo en la Tabla 9.20 corresponde a P_2 (1 h.e.) en M_1, por lo que debe ser programado el primero. En base a esto, la secuencia de operaciones y la tabla de pedidos pendientes serían: $P_2 - P_? - P_? - P_? - P_?$ y la Tabla 9.21.

Tabla 9.21. Secuenciación pendiente

	P_1	P_2	P_3	P_4	P_5
M_1	5	-	9	3	10
M_2	2	-	7	8	4

Iteración 2:

El menor de los tiempos restantes corresponde ahora a P_1 (2 h.e.) asignado a la máquina M_2; por tanto, P_1 debe ser programado detrás de todos los que restan, en el último lugar de la secuencia, que queda como sigue: $P_2 - P_? - P_? - P_? - P_1$.

Tabla 9.22. Secuenciación pendiente

	P_1	P_2	P_3	P_4	P_5
M_1	-	-	9	3	10
M_2	-	-	7	8	4

Iteración 3:

Menor de los tiempos restantes: 3 h.e., correspondiente a P_4 en M_1, por lo que P_4 debe programarse delante de los restantes (pero detrás del P_2): $P_2 - P_4 - P_? - P_? - P_1$ y Tabla 9.23.

Tabla 9.23. Secuenciación pendiente

	P_1	P_2	P_3	P_4	P_5
M_1	-	-	9	-	10
M_2	-	-	7	-	4

Iteración 4:

Menor de los tiempos restantes: 4 h.e., de P_5 en M_2, por lo que debe programarse detrás (pero delante del P_1): $P_2 - P_4 - P_? - P_5 - P_1$ y Tabla 9.24.

Tabla 9.24. Secuenciación pendiente

	P_1	P_2	P_3	P_4	P_5
M_1	-	-	9	-	-
M_2	-	-	7	-	-

Iteración 5:

Como es lógico, la única posibilidad en este caso es situar al P_3 en el centro de la secuencia. El orden definitivo de realización de los pedidos sería: $P_2 - P_4 - P_3 - P_5 - P_1$. En la Figura 9.5 puede observarse gráficamente cuál sería la secuenciación propuesta. A través de ella, podemos determinar fácilmente el tiempo total para los cinco pedidos y el tiempo ocioso de cada una de las máquinas.

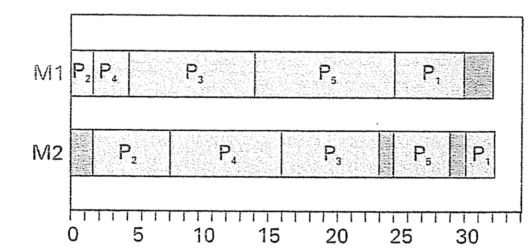


Figura 9.5. Secuenciación propuesta

b) La regla de Johnson para N pedidos y tres máquinas

El mismo Johnson desarrolló la ampliación de su algoritmo para el caso de 3 máquinas, a las que denominaremos M1, M2 y M3, indicando el subíndice el orden de paso. El algoritmo se basa en la creación de dos máquinas ficticias, M4 y M5, en las que los tiempos de los trabajos serían los siguientes:

- En M4, el tiempo de ejecución para el trabajo *i* sería igual a la suma de sus tiempos en M1 y M2.
- En la máquina M5, el tiempo de ejecución para el trabajo *i* sería igual a la suma de sus tiempos en M2 y M3.

Determinados dichos tiempos, se aplica para las dos máquinas ficticias el mismo proceso que se detalló para el caso anterior, teniendo en cuenta que los trabajos pasan primero por M4 y luego por M5. Para que la regla sea válida es necesario que los tiempos menores de los pedidos en la primera y última máquinas de la ruta no sean inferiores al máximo tiempo en la máquina intermedia.

c) N pedidos y M máquinas.

Aunque el algoritmo descrito produce buenos resultados, es obvio que su aplicación es muy limitada. Por ello Campbell (1966) desarrolló un algoritmo para extenderlo a cualquier número de máquinas, aunque es bastante más complejo de llevar a la práctica, pues al aumentar el número de máquinas y pedidos, el tiempo necesario para resolver el problema crece notablemente.

Básicamente, este algoritmo consiste en crear dos máquinas ficticias, *Ma* y *Mb*, cuyos tiempos de proceso se obtendrán mediante la suma de los tiempos correspondientes a varias máquinas reales consecutivas, dependiendo de la iteración realizada (en la primera de ellas, *Ma* acumulará sólo el tiempo de la primera máquina real, en la segunda iteración el de las dos primeras, en la tercera el de las tres primeras, etc.). Se generan, de esta forma, $m-1$ alternativas (siendo m el número de máquinas reales). De entre ellas, se elegirá, aplicando el método de Johnson, aquella con menor tiempo total de ejecución.

d) Otras técnicas

Existen muchos otros modelos para resolver este tipo de problema, tanto optimizadores como heurísticos o de simulación[15]. Sin embargo, lo cierto es que, como en los que acabamos de exponer, su aplicación práctica (muchas veces imposible, debido a lo restrictivo de sus hipótesis de partida) se vuelve muy compleja cuando aumenta el número de máquinas y pedidos. En otras ocasiones no permiten llegar a un óptimo y, si lo hacen, éste no contempla todos los objetivos del problema[16]. En realidad, no existe ninguna técnica que permita obtener el óptimo del problema de secuenciación para cualquier caso posible. Por todo ello, las empresas se han desplazado hacia el uso de métodos que, si bien no permiten llegar a una solución óptima, sí proporcionan soluciones satisfactorias de cara a su objetivo prioritario. Las técnicas que aparecen en el apartado siguiente son las más empleadas para la resolución de este problema, dado que no es más que un caso particular del que analizaremos a continuación.

[15] Ver, por ejemplo, Lomnicki (1963) o Ignall-Scharage (1965). Otros modelos pueden verse en Díez (1982, págs. 46 a 141).

[16] Por ejemplo, en los casos anteriores, minimizar el tiempo total invertido en el desarrollo de los *N* pedidos, no implica entregarlos en la fecha planificada.

9.5.2. Fabricación en *Job-Shop*

Se trata de empresas que suelen fabricar bajo pedido. Como mencionamos anteriormente, se trata de la fabricación de lotes normalmente pequeños, de items muy dispares, los cuales tienen diferente secuencia de paso por las máquinas o CT; éstos son utilizados en el desarrollo de una o varias operaciones de las rutas de algunos de los items. Además, para cada uno de ellos, la obtención de un lote puede diferir notablemente en términos de materiales necesarios, tiempo de procesamiento en cada CT, necesidades de preparación, etc. El que la secuencia de paso de los *N* pedidos a procesar por las *M* máquinas sea diferente implica que no es suficiente establecer el orden de entrada en la primera (como en el caso anterior), sino que hay que determinar la secuencia en todas y cada una de ellas. Esto, además, ha de hacerse considerando las distintas rutas, de forma que un pedido no puede entrar en un CT hasta que se hayan realizado las operaciones precedentes de su ruta.

La ordenación va a incidir aún más que antes en los tiempos ociosos de los CT y, por tanto, en el aprovechamiento de los recursos, en los volúmenes de producción en proceso y en las fechas de entrega. Habrá que determinar, pues, la ordenación o secuencia de paso de los *N* lotes en cada una de las *M* máquinas que, respetando las rutas de los pedidos y la capacidad disponible, cumpla las fechas de entrega de éstos, empleando el menor tiempo total en la obtención de todos los lotes a procesar (o lo que es igual, reduciendo al mínimo los tiempos ociosos en las *M* máquinas). Se trata, sin duda, del caso más complejo de secuenciación; por ello, aunque haya habido algunos intentos de conseguir una técnica optimizadora con validez general por parte de diversos autores[17], puede decirse que no existe ninguna. Las técnicas de simulación, incluso informatizadas, son también de difícil aplicación debido al altísimo número de posibles soluciones del problema. Como indica A. Díaz (1994, pág. 267), «el número de soluciones a chequear sería $(N!)^M$». Ello hace que la práctica haya derivado hacia la utilización de técnicas heurísticas o de prueba y error. En ambos casos se obtienen soluciones aceptables, que pueden estar más o menos cerca del óptimo. Hay que decir que ninguna suele contemplar simultáneamente la multiplicidad de objetivos del problema, basándose en aquel que es prioritario para la empresa (cumplimiento de fechas de entrega o minimización del tiempo de obtención de los lotes), intentando llegar a una solución aceptable para el mismo. Normalmente, y sobre todo para valores altos de *N* y *M*, la solución obtenida por las técnicas heurísticas será más cercana al óptimo que la obtenida por métodos de prueba y error.

9.5.2.1. *Procedimientos de prueba y error: El gráfico de Gantt*[18]

Fue desarrollado por Henry L. Gantt en los años diez y, aunque ha sido posteriormente adaptado en la simbología empleada, mantiene intactas su esencia y características. Permite representar el desarrollo de las diferentes operaciones a realizar de cada lote en cada CT en función del tiempo, pudiéndose apreciar, además, para una solución propuesta, la coordinación de las secuencias, las colas de espera y los tiempos ociosos. A partir de éstas se pueden proponer soluciones alternativas encaminadas a acercarse más al objetivo deseado. No es, pues, una técnica de secuenciación propiamente dicha, pero es sumamente útil para representar la secuencia de actividades en múltiples máquinas, permitiendo apreciar sus efectos.

[17] Por ejemplo: Bowman (1959), Manne (1970), Greenberg (1968), etc.

[18] Para un tratamiento más detallado ver J. A. D. Machuca y otros (1990, Capítulo 9).

En este gráfico, las distintas operaciones se representan por líneas horizontales, de longitud proporcional a su duración. Generalmente, se consideran tres tiempos relacionados con las actividades: el *tiempo de preparación de las mismas*, t_p, el *tiempo de ejecución* propiamente dicho, t_e, y el *tiempo de tránsito*, t_t, entre una operación y la siguiente. La longitud de t_e se calcula multiplicando el número de items del lote por el tiempo unitario de ejecución, t_{eu} (ver Tabla 9.25).

EJEMPLO 9.9. Aplicación del gráfico de Gantt

En el proceso de fabricación de un determinado componente intervienen siete operaciones. Los respectivos tiempos de preparación, los tiempos de ejecución unitarios (en h.e.), y los tiempos de ejecución del lote, t_{ei}, están recogidos en la Tabla 9.25. Considerando que hemos recibido un pedido de 100 unidades del citado componente, se desea representar mediante el gráfico de Gantt la secuencia de operaciones, suponiendo que no existen restricciones de recursos.

La secuenciación deseada puede realizarse contemplando dos posibilidades que comentaremos a continuación.

Tabla 9.25[19] Tiempos de las operaciones

O_i	O1	O2	O3	O4	O5	O6	O7
t_p	1	1	0,7	0,9	2,3	0,6	5,5
t_{eui}		0,15	0,3	0,15	1,5	0,75	
t_{ei}	5	15	30	15	150	75	12

a) **Sin solapamiento de tareas.**

En este caso se trabaja bajo la hipótesis de que no se podrá dar comienzo a ninguna actividad hasta que se haya finalizado la operación anterior sobre todas y cada una de las unidades a fabricar. En estas condiciones, el gráfico de Gantt resultante da lugar a un tiempo total de 314 h.e. para un lote de 100 unidades y aparece en la Figura 9.6, donde, por razones de espacio, no se ha respetado la escala de tiempos.

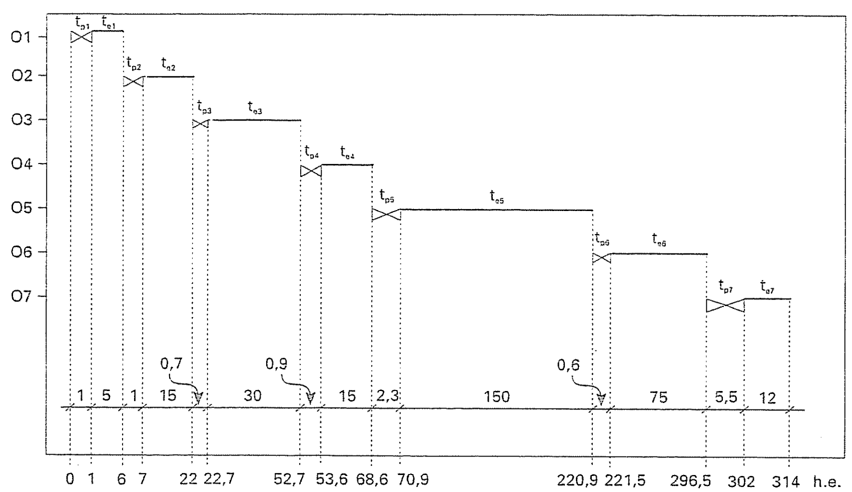


Figura 9.6. Secuenciación sin solapamiento

[19] Por cuestiones técnicas, las operaciones O1 y O7 han de realizarse sobre todo el lote a la vez.

b) **Con solapamientos**

Si no se cumple la hipótesis planteada en a), la duración total a la que da lugar la programación anterior puede ser acortada solapando (simultaneando) la realización de las diferentes operaciones. Este *solapamiento* puede realizarse *al principio o al final*. Para que dos operaciones puedan simultanearse al principio, es necesario que el tiempo de ejecución unitario de la que se realiza en primer lugar, O_i, sea menor que el de la segunda, O_{i+1}. Cumpliéndose esta condición, O_{i+1} podrá comenzar cuando O_i se haya realizado, al menos, sobre un ítem del lote, por lo que su fecha de comienzo, f_{i+1}, será igual a la fecha de comienzo de la primera, f_i, más el tiempo de ejecución unitario de la operación O_i, t_{eui} (ver Figura 9.7).

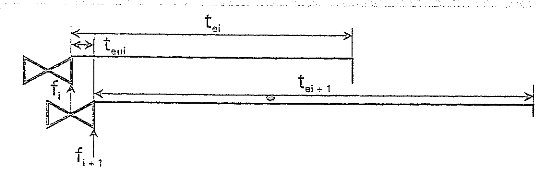


Figura 9.7. Solapamiento al principio (t_t = 0).

Con respecto al solapamiento al principio hay que tener en cuenta que:

a) Si existiese tiempo de tránsito entre O_i y O_{i+1} ($=t_{t(i,\ i+1)}$), éste tendría que ser considerado para calcular la fecha de comienzo de la segunda operación, que vendría dada por $f_{i+1} = f_i + t_{eui} + t_{t(i,\ i+1)}$.

b) Dado que estamos suponiendo que, una vez comenzada una operación, ésta se ejecuta sobre todos los items sin interrupción, no podremos solapar «al principio» cuando $t_{ei} > t_{e(i+1)}$, pues llegaríamos al contrasentido de terminar la operación O_{i+1} antes que la O_i, lo cual es imposible.

Para salvar la última situación descrita podemos simultanear las operaciones «al final» (figura 9.8). Para ello, hemos de tener en cuenta que, para realizar la operación O_{i+1} sobre la última de las piezas de la serie, es necesario que, previamente, se haya realizado sobre ésta la tarea O_i. De esta forma, la fecha de terminación de la operación O_{i+1}, F_{i+1}, será igual a la de la tarea O_i, F_i, más el tiempo de ejecución unitario de la tarea O_{i+1} ($t_{eu(i+1)} = t_{e(i+1)}$/ n.° de items), más el tiempo de tránsito entre ambas operaciones $t_{t(i,\ i+1)}$, cuando éste exista.

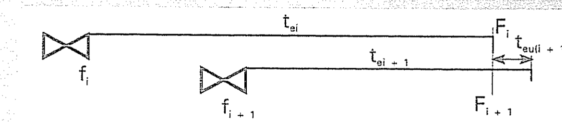


Figura 9.8. Solapamiento al final (t_t = 0)

Basándonos en los comentarios anteriores, el gráfico de Gantt (con posibilidad de solapamientos) resultante para nuestro ejemplo es el recogido en la Figura 9.9. Los

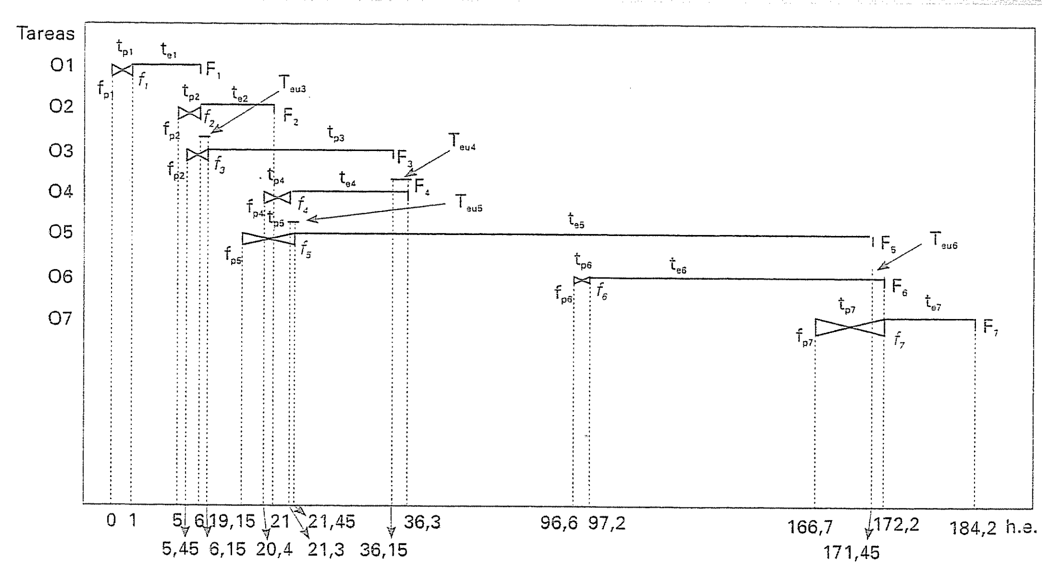


Figura 9.9. Secuenciación con solapamiento.

cálculos que han conducido a él han sido realizados teniendo en cuenta los datos de la Tabla 9.26 y las siguientes consideraciones:

- Debido al hecho de que O_1 y O_7 han de realizarse sobre todas las piezas al mismo tiempo, las operaciones O_1 y O_2 y las O_6 y O_7 no podrán simultanearse.
- Los tiempos de preparación de las diferentes tareas se han colocado inmediatamente a la izquierda de sus respectivos tiempos de ejecución.

Operación 1

Comienzo preparación: $f_{p1} = 0$ h.e.
Comienzo ejecución: $f_1 = f_{p1} + t_{p1} = 0 + 1 = 1$ h.e.
Terminación: $F_1 = f_1 + t_{e1} = 1 + 5 = 6$ h.e.

Operación 2 (no hay solapamiento)

$f_2 = F_1 = 6$ h.e.
$f_{p2} = f_2 - t_{p2} = 6 - 1 = 5$ h.e.
$F_2 = f_2 + t_{e2} = 6 + 15 = 21$ h.e.

Operación 3 (solapamiento al principio, ya que $t_{e2} < t_{e3}$)

$f_3 = f_2 + t_{eu2} = 6 + 0{,}15 = 6{,}15$ h.e.
$F_3 = f_3 + t_{e3} = 6{,}15 + 30 = 36{,}15$ h.e.
$f_{p3} = f_3 - t_{p3} = 6{,}15 - 0{,}7 = 5{,}45$ h.e.

Operación 4 ($t_{e3} > t_{e4}$, solapamiento al final)

$F_4 = F_3 + t_{eu4} = 36{,}15 + 0{,}15 = 36.3$ h.e
$f_4 = F_4 - t_{e4} = 36{,}3 - 15 = 21{,}3$ h.e.
$f_{p4} = f_4 - t_{p4} = 21{,}3 - 0{,}9 = 20{,}4$ h.e.

Operación 5 ($t_{e4} < t_{e5}$, solapamiento al principio)

$f_5 = f_4 + t_{eu5} = 21{,}3 + 0{,}15 = 21{,}45$ h.e.
$F_5 = f_5 + t_{e5} = 21{,}45 + 150 = 171{,}45$ h.e.
$f_{p5} = f_5 - t_{p5} = 21{,}45 - 2{,}3 = 19{,}15$ h.e.

Operación 6 ($t_{e5} > t_{e6}$, solapamiento al final)

$F_6 = F_5 + t_{eu6} = 171{,}45 + 0{,}75 = 172{,}2$ h.e.
$f_6 = F_6 - t_{e6} = 172{,}2 - 75 = 97{,}2$ h.e.
$f_{p6} = f_6 - t_{p6} = 97{,}2 - 0{,}6 = 96{,}6$ h.e.

Operación 7 (no hay solapamiento)

$f_7 = F_6 = 172{,}2$ h.e.
$F_7 = f_7 + t_{e7} = 172{,}2 + 12 = 184{,}2$ h.e.
$f_{p7} = f_7 - t_{p7} = 172{,}2 - 5{,}5 = 166{,}7$ h.e.

En la Figura 9.9 se observa que, gracias al solapamiento de tareas, la duración prevista para el proceso ha pasado de 314 h.e a 184,2 h.e.

No cabe duda de que la programación ilustrada en la Figura 9.9 nos proporciona el menor tiempo de ejecución del proceso para las hipótesis de partida. Ahora bien, es interesante resaltar que trabajar con las previsiones proporcionadas por este *Gantt mínimo* entraña un cierto riesgo; por ejemplo, cualquier incidencia sobre una operación puede provocar, dado lo ajustado de la programación, la interrupción de la siguiente o siguientes (por falta de material, etc.), con los consiguientes efectos nocivos en la cadena de producción.

Por otra parte, hay que decir que se ha supuesto el procesamiento de un único pedido en varios CT sin considerar más lotes de otros items, lo cual es una simplificación de los casos más frecuentes en la práctica.

A pesar de la sencillez de la técnica explicada, es evidente que, a medida que aumenta el número de pedidos, de operaciones y de Centros de Trabajo, su utilización se vuelve complicada, y mucho más si se pretende llegar a una solución que se acerque al óptimo del problema.

9.5.2.2. *Reglas de prioridad*

Se trata del mismo procedimiento ya descrito en el Apartado 9.5.1.1.*b*), el cual permite seleccionar el próximo trabajo a realizar en un CT cuando éste está próximo a quedarse libre, aunque aquí existe una mayor variedad de reglas. La secuencia de paso se determina para cada máquina por separado, y sólo se consideran los pedidos que están esperando a ser procesados en ella. La elección de una determinada regla dependerá del caso concreto, siendo seleccionada en base al objetivo prioritario marcado y a los resultados que, de cara al mismo, presenten cada una de ellas. Las más utilizadas son las que comentamos en el Cuadro 9.2[20].

[20] Para una lista más completa puede verse, por ejemplo, A. Diaz (1994, pág. 275), Meredith (1992, pág. 496 y ss.), Gaither (1992, pág. 505), o Adam-Ebert (1992, pág. 421 y ss.).

Cuadro 9.2 Principales reglas de prioridad

Operación más corta (OMC). También se denomina SOT (*Shortest Operation Time*) o SIO (*Shortest Inminent Operation*). De acuerdo con ella, se elige como próximo trabajo a realizar en un CT, aquel cuya operación en dicho Centro tarde menos en realizarse. De esa forma se hace máximo el número de trabajos procesados por período en el CT y, por tanto, se ayuda a minimizar los tiempos ociosos. Sin embargo, se ignora la información relativa a las fechas de entrega planificadas.

Operación más larga (OML). También denominada LOT (*Longest Operation Time*) o LIO (*Longest Inminent Operation*). El próximo trabajo a realizar en un CT será aquel cuya operación en dicho centro tarde más en realizarse. La idea que la preside es que, normalmente, los trabajos más largos son los más grandes y más importantes y, por tanto, deben ser los primeros en realizarse. Se supone, además, que éstos serán los trabajos con menor holgura (aunque no siempre ha de ser así, pues esto dependerá también de la fecha de entrega).

Trabajo más corto (TMC). También denominada SRPT (*Shortest Remaining Processing Time*). El sentido es similar al de la regla OMC, con la diferencia de que aquí se selecciona el trabajo al que le reste el menor tiempo de proceso (preparación y ejecución) considerando el conjunto de sus operaciones. Con ello se pretende terminar el mayor número posible de trabajos por unidad de tiempo, lo que supone que ayudará a emplear el menor tiempo total de procesamiento de los pedidos en todas las máquinas.

Trabajo más largo (TML). También denominada LRPT (*Longest Remaining Processing Time*). Es similar a la OML, pero tomando ahora aquel trabajo que tenga mayor tiempo de proceso restante.

Menor tiempo restante (MTR). También denominada SRT (*Shortest Remaining Time*), con la que se ejecutará primero aquel pedido al que le quede menos tiempo hasta su fecha de entrega planificada. Con ello se pretende ejecutar primero el pedido más urgente, intentando así cumplir las fechas de entrega. No obstante, no considera un aspecto fundamental el tiempo que queda para entregar el trabajo (que es función del tiempo de proceso que le falte para ser terminado).

Menor ratio crítico (MRC). Ya definido como tiempo restante/trabajo restante (ahora el denominador sería el Tiempo de Proceso restante). Esta regla intenta corregir el defecto señalado para la anterior, proporcionando una visión comparada del tiempo y la carga que restan para entregar y concluir un trabajo. Su idea básica es la misma.

Menor fecha de entrega (MFE) o DD (*Due Date*). Se realiza en primer lugar aquel pedido cuya fecha de entrega está más próxima, cualquiera que sea el tiempo de proceso que le reste. Es una aplicación simple del objetivo de cumplir las fechas de entrega, que deja fuera las consideraciones sobre el logro del menor tiempo total de procesamiento de los pedidos.

Menor tiempo de holgura (MTH). También llamado DS (*Dinamic Slack*) y *Slack*. Se trata de realizar primero aquel trabajo con menor tiempo de holgura, siendo ésta la diferencia entre el tiempo que falta hasta la fecha de entrega y el tiempo de proceso restante. Al igual que el MRC, pretende dar una idea del tiempo que resta para cumplir con la fecha de entrega planificada en comparación con el tiempo de proceso que falta para acabarlo.

Menor tiempo de holgura por operación restante (MTHOR). También llamado DS/RO (*Dynamic Slack per Remaining Operation*). Es una variación del anterior, en el que la holgura se relaciona además con el número de operaciones que le restan al pedido para ser terminado. En este caso, a la idea de seleccionar antes el trabajo de menor holgura se le añade la consideración del número de operaciones restantes, considerándose que es más difícil completar aquel con mayor número de éstas, al tener que ser programado a través de más Centros de Trabajo.

Aunque las reglas de prioridad no proporcionan soluciones óptimas al problema de la secuenciación, sí pueden facilitar soluciones aceptables desde el punto de vista del objetivo elegido. Además, tienen la ventaja de ser sumamente operativas, sobre todo cuando los pedidos son muchos y de corta duración. De otro lado, si bien es cierto que las reglas consideran cada CT por separado, la coordinación entre la secuencia de las diferentes máquinas o CT se derivará de la Lista de Expedición, documento que recogerá el Programa de Operaciones derivado de la secuenciación realizada, el cual analizaremos posteriormente. El Ejemplo 9.10 ilustra la aplicación de las reglas mencionadas.

EJEMPLO 9.10. Aplicación de las reglas de prioridad

Vamos a utilizar el ejemplo que se describió en el Apartado 5.4 para la elaboración del Plan CRP. Supondremos que nos encontramos al final del día 36 del calendario de taller (final del primer día de la semana 8 del Horizonte de Planificación) y que se ha venido cumpliendo, casi a la perfección, el Plan de Materiales detallado en la Tabla 5.6. En base a esta situación, el Informe de Producción de los Pedidos en Curso aparece en la Tabla 9.26. La ruta de cada ítem, junto con los tiempos de carga (por preparación y ejecución) en cada CT por cada operación (para diferentes tamaños de lote que se emplean), fueron determinados en el Apéndice 5.A (Figura 5.2 y Tabla 5.17); la Tabla 9.27 incluye un resumen de los mismos. Recordemos, además, que la capacidad disponible diaria de los tres CT que se utilizan fue establecida en 8,16 h.e. en el CT1, 6,5 h.e. en el CT2 y 5,45 h.e. en el CT3.

a) Operación más corta (OMC)

En la Tabla 9.26 observamos que el pedido 1532 todavía no se ha comenzado y espera para la O1, mientras que el 1533 espera para la O4. La Tabla 9.27 indica que los tiempos necesarios de carga en el CT3 para ejecutar las operaciones mencionadas son, respectivamente, de 16,5 y 10,42 h.e. (ejecución + preparación). Estas son las cantidades colocadas en la fila 3 de la Tabla 9.28. Una vez ejecutado el pedido 1530 en CT3, el próximo sería el 1533 según esta Regla de Prioridad (fila 4). Del mismo modo se opera con CT2 y CT1.

Tabla 9.26. Datos del Informe de Producción a final del día 36

N.° de pedido	Item	Cantidad	Emisión: Final día	Entrega: Final día	Situación del pedido
1.530	P2	113	30	40	Procesándose la O6 en el CT3 - Le restan 4 h.e.
1.531	112	357	30	45	En cola de espera en el CT2 para la O8
1.532	P1	186	35	45	En cola de espera en el CT3 para la O1
1.533	P2	113	35	45	En cola de espera en el CT3 para la O4
1.534	121	264	35	45	En cola de espera en el CT2 para la O10
1.535	112	135	35	50	Procesándose la O7 en el CT1 - Le restan 10 h.e.

Tabla 9.27. Rutas y tiempos de carga para los diferentes items (en horas estándar)

Item	P1	P2	112	112	112	121
Tamaño de lote a emitir	186	113	135	222	357	264
Tamaño de lote a obtener	170	100	113	186	299	226
Pedidos correspondientes (ver Tabla 9.26)	1532	1533 1530	1535		1531	1534
Primera operación (ver Figura 5.2)	1	4	7	7	7	10
Centro de trabajo	CT3	CT3	CT1	CT1	CT1	CT2
Carga por preparación	1	1	1	1	1	1
Carga por ejecución para el lote	15,5	9,42	11,25	18,5	29,5	8,8
Segunda operación	2	5	8	8	8	11
Centro de trabajo	CT2	CT2	CT2	CT2	CT2	CT1
Carga por preparación	1	1	1	1	1	1
Carga por ejecución para el lote	2,94	4,47	10,12	16,65	26,77	4,68
Tercera operación	3	6	9	9	9	
Centro de trabajo	CT3	CT3	CT1	CT1	CT1	
Carga por preparación	1	1	1	1	1	
Carga por ejecución para el lote	4,32	0,85	8,64	14,21	22,85	

Tabla 9.28. Ordenación según diversas Reglas de Prioridad (* indica Pedido en ejecución y — Indiferencia en la prioridad)

1	Centros de trabajo	CT1	CT2		CT3		
2	Pedidos en centro de trabajo	1535	1531	1534	1530	1532	1533
3	Tiempo de proceso en centro de trabajo actual (*h.e.*)	10	27,77	9,8	4	16,5	10,42
4	Orden según operación más corta	1	2	1	*	2	1
5	Orden según operación más larga	1	1	2	*	1	2
6	Tiempo de proceso restante (días)	4,118	7,194	2,203	0,73	4,609	3,091
7	Orden según trabajo más corto	1	2	1	*	2	1
8	Orden según trabajo más largo	1	1	2	*	1	2
9	Tiempo restante (días) TR	14	9	9	4	9	9
10	Orden según MTR	1	—	—	*	—	—
11	Ratio crítico = Fila 9/Fila 6	3,187	1,251	4,085	8,16	1,953	2,911
12	Orden según ratio crítico	1	1	2	*	1	2
13	Fecha de entrega planificada	50	45	45	40	45	45
14	Orden según fecha de entrega	1	—	—	*	—	—
15	Tiempo de holgura TH = (Fila 9 — Fila 6) en días	9,608	1,806	6,797	3,51	4,398	5,909
16	Orden según MTH	1	1	2	*	1	2
17	Número de operaciones restantes	3	2	2	1	3	3
18	Tiempo de holgura por operación restante (15)/(17)	3,202	0,903	3,398	3,51	1,466	1,969
19	Orden según MTH por operación restante	1	1	2	*	1	2

b) Operación más larga (OML)

De forma análoga, observando el Tiempo de Proceso en CT3, colocado en la fila 3 de la Tabla 9.28, el próximo trabajo a realizar una vez se concluya el 1530, será el 1532 (fila 5). Se procede de igual forma para CT2 y CT1.

c) Trabajo más corto (TMC)

Siguiendo con el CT3, el tiempo de proceso (en días) que le resta a cada pedido, sería:

Para el 1532: Tiempo de O1 ((1 + 15,5) h.e/5,45[21] (h.e/día) en CT3) + tiempo de O2 ((1 + 2,94) h.e/6,5 (h.e/día) en CT2) + tiempo de O3 ((1 + 4,32) h.e/5,45 (h.e/día) en CT3) = 4,609 días.

Para el 1533: Tiempo de las operaciones O4, O5 y O6 (Tabla 9.27), que suman 3,091 días. Calculados estos tiempos y colocados en la fila 6 de la Tabla 9.28, bastará elegir como primer pedido el correspondiente al menor tiempo de procesamiento, es decir, el trabajo 1533 (ver fila 7).

d) Trabajo más largo (TML)

En todo análogo al anterior, salvo que se elige el de mayor tiempo, es decir, el 1532 (Fila 8).

e) Menor tiempo restante (MTR)

En primer lugar, para obtener el TR para todos los pedidos, habrá que restar a la fecha de entrega planificada (columna quinta de la Tabla 9.26), la fecha en que nos encontramos (día 36) (fila 9 de la Tabla 9.28). Como se puede apreciar, en el CT2 y CT3 el TR es 9 para todos los pedidos, lo que hace que sea indiferente el orden de secuencia de los mismos. Este efecto es normal cuando se parte de Pedidos Planificados en MRP, pues, como ya vimos, en la mayoría de las ocasiones las cifras se refieren a final de semana (ver Capítulos 4 y 5), no distinguiendo días dentro de ella.

[21] Capacidad diaria de CT3 en h.e.

f) **Menor ratio crítico (MRC)**

Para hallar el ratio crítico se dividen las filas 9 y 6, obteniendo la fila 11. Los pedidos se ordenan de acuerdo con el menor RC (fila 12).

g) **Menor fecha de entrega (MFE)**

Las fechas de entrega de los pedidos se encuentran en la columna 5 de la Tabla 9.26, por lo que no hay más que trasladarlas a la fila 13 de la Tabla 9.28. En este caso, y por los motivos ya descritos para la Regla del Menor Tiempo Restante, vuelve a ser indiferente escoger uno u otro pedido.

h) **Menor tiempo de holgura (MTH)**

Los tiempos de holgura (fila 15 de Tabla 9.28) se calcularán restando los Tiempos Restantes y los Tiempos de Proceso o Trabajo Restante (filas 9 y 6), elegiendo primero aquel con menor TH dentro de cada CT (fila 16).

i) **MTH por operación restante (MTHOR)**

El número de operaciones que resta a cada pedido se deduce de la operación que está en ejecución (columna 6 de la Tabla 9.26) y de las operaciones de su ruta (Tabla 9.27), colocándose el resultado en la fila 17 de la Tabla 9.28. Luego, bastará dividir el Tiempo de Holgura (fila 15) entre el número de operaciones (fila 17) para obtener el Tiempo de Holgura por Operación (fila 18). El orden resultante se detalla en la fila 19.

9.5.2.3. *Otras técnicas*

Además de las mencionadas, existen otras técnicas que pueden emplearse para resolver la secuenciación de operaciones en Job-Shop, muchas de ellas apoyadas en el ordenador. En ocasiones puede aplicarse la Teoría de Colas (ver Anexo a Parte I) a los trabajos que esperan para ser procesados en el CT. Potencialmente, proporcionan una solución óptima al problema pero su aplicación es limitada, dado que «la complejidad matemática se vuelve aplastante cuando las hipótesis sobre los momentos de llegada y tiempo de procesamiento no concuerdan con las pocas distribuciones bien conocidas (por ejemplo: exponencial y Poisson) y hay que emplear distribuciones empíricas más realistas» (Adam-Ebert, 1992, página 425). Otro sistema bastante extendido es OPT (*Optimized Production Technology*), ya estudiado en el Capítulo 8. Otra técnica informatizada aplicable al caso que nos ocupa es Q-Control (Sandman, 1980) cuyo algoritmo, basado igualmente en la detección de los CT cuellos de botella, es también desconocido, dado que la propiedad intelectual del software es mantenida por su creador.

Por último, decir que las aplicaciones informatizadas más avanzadas se desarrollan en la vía del uso de la Inteligencia Artificial. Ya en 1984 se desarrolló ISIS (*Intelligent Scheduling and Information System* (Fox-Smith, 1984)), que busca una solución óptima para programación con restricciones y que, caso de no encontrarla, relaja aquéllas en función de su importancia relativa. Posteriormente se han desarrollado otras aplicaciones, tales como el MARS (*Management Analysis Resource Scheduler* (Marsh, 1985)), o el TI (*Texas Instrument System* (Lyman, 1986)).

9.6. PROGRAMACION DETALLADA

Llegamos a la tercera fase de la Programación de Operaciones a muy corto plazo, en la que se determinarán los momentos de comienzo y fin de las actividades de cada Centro de Trabajo, así como de las Operaciones de cada pedido para la secuenciación realizada. En ocasiones, el detalle de los momentos de comienzo y fin de las operaciones se habrá desarrollado durante el proceso de secuenciación, tal y como ocurriría de emplear un Gráfico de Gantt, que, además, puede servir de vía de comunicación con los talleres. En otras, sin embargo, sólo se conocerá la secuencia de entrada en cada CT, pudiéndonos encontrar con las dos situaciones que comentamos seguidamente.

9.6.1. Programación hacia delante y hacia atrás

Si se ha determinado la secuencia de entrada de todos los pedidos en todas las máquinas, ahora sería necesario establecer los momentos de entrada y salida en las mismas. La forma de hacerlo podría ser empleando una opción hacia delante o hacia detrás (ver Apéndice 5.A). La diferencia será que, ahora, los Tiempos de Cola vendrán marcados por la secuencia de procesamiento de los pedidos ya establecida y que, de cara a lograr el cumplimiento de las fechas de entrega, la capacidad disponible de los CT podría aumentarse mediante el uso de medidas de ajuste temporal[22]. Posteriormente, bastaría ordenarlas para cada CT con objeto de establecer el documento que servirá de referencia al encargado del mismo. También podría reflejarse en un Gráfico de Gantt.

9.6.2. Listas de expedición

Si se ha determinado sólo cuál es el próximo trabajo a procesar en cada CT (como ocurría al emplear las reglas de prioridad), no es posible realizar una programación tan pormenorizada. Esto es debido a que hasta que el trabajo seleccionado no esté próximo a acabarse, no se determinará el siguiente a procesar en el CT; ello implica que no conoceremos hasta entonces cuál va a ser el valor real de su Cola de Espera y, por tanto, cuándo comenzarán y terminarán sus operaciones restantes. Este problema se salva mediante el uso de la **Lista de Expedición** (*Dispatch List*), que analizamos en el Ejemplo 9.11 para el caso del ejemplo precedente.

EJEMPLO 9.11. Elaboración de la Lista de Expedición

Al final de cada jornada, y en base al informe de producción desarrollado, se establecerá (tal y como se hacía en la Tabla 9.26 del ejemplo anterior) el estado en que se encuentra cada uno de los pedidos en los CT. En base a éste se elaborará la Lista de Expedición de cada CT para el día siguiente, la cual puede adoptar diversas formas. Si tomamos como regla de prioridad el menor Ratio Crítico, un formato que puede adoptar dicha Lista sería el que aparece en la Tabla 9.29. En ella, ordenados de menor a mayor Ratio Crítico, se colocan en la parte superior los pedidos que se encuentran en el CT en cuestión (CT2 en nuestro caso) y en la inferior los que se encuentran en el CT previo a éste en su ruta. En nuestro caso: el 1532 está en la O1 en el CT3, tras lo cual pasará al CT2 para la O2; el 1533 pasará a CT2 para la O5 cuando acabe la O4 en el CT3; por último, el 1535 pasará al CT2 para la O8 cuando acabe la O7 en el CT1. Basta observar, para cada pedido, la operación que está realizándose o en cola y, después, consultar la siguiente en la ruta y el CT en que se realiza. La Tabla 9.29 muestra la información que caracteriza a esta Lista de Expedición. La décima columna recoge las horas que les quedan de proceso (ejecución y preparación), para concluir la operación que han de sufrir en este CT. Las restantes son ya conocidas.

Tabla 9.29. Lista de expedición para el CT2

Fecha: día 36			Semana: 8		CT2		Capacidad diaria: 6,5 h.e.			
CT	Pedido	Descripción	Código Item	Operación en ejecución o espera	Prioridad Ratio Crítico	Tamaño Lote	Horas próxima Oi en este CT	Próximo CT	Trabajo restante	Tiempo restante
CT2	1531		112	↘01	1,251	357	27,77	CT1	7,194	9
CT2	1534		121	↘010	4,085	264	9,8	CT1	2,203	9
CT anterior: CT3	1532		P1	01	1,301	186	3,94	CT2	4,609	9
CT anterior: CT3	1533		P2	04	2,911	113	5,47	CT2	3,091	9
CT anterior: CT1	1535		112	07	3,187	135	11,12	CT2	4,392	14

[22] Esto deberá ser posible si estamos partiendo de un Plan de Materiales factible.

En esta lista se pueden incluir también los próximos pedidos planificados a emitir que tienen que pasar por el CT. Por supuesto, es necesario que todo el procedimiento esté informatizado y conectado con la Planificación de Materiales. De esta forma, los posibles cambios en las circunstancias de los distintos pedidos podrán ser rápidamente asumidos e incluidos al recalcular la Regla de Prioridad para reelaborar las Listas de Expedición (si las operaciones son de corta duración, éstas podrían ser calculadas, por ejemplo, cada 8 horas).

Diariamente se remitirá su Lista de Expedición a cada CT, de forma que el encargado sabrá el trabajo que ha de acometer. Además conocerá qué pedidos vendrán a continuación, dónde se encuentran y qué carga van a generar. Ello le permitirá coordinar su actividad con otros CT; por ejemplo, si termina un pedido y ha de esperar que le llegue otro para empezar a trabajar, puede ver cuál va a ser el próximo a procesar y llevar a cabo la preparación correspondiente, o incluso dirigirse al CT en que se encuentra ahora y tomar, en su caso, la parte del mismo que esté acabada, comenzando sobre él su actividad, evitando, con ello, tiempos ociosos. Sabrá, pues, en cada momento, qué operaciones de qué pedidos ha de realizar para lograr cumplir las fechas de entrega (supuesto un ratio crítico mayor que uno) y, con ello, los planes de nivel superior.

9.7. PROGRAMACION DE OPERACIONES A CAPACIDAD FINITA

Todas las técnicas analizadas en el epígrafe anterior (salvo OPT y Q-Control, que pueden considerarse híbridos), programan las operaciones partiendo de las prioridades de los pedidos planificados, que no consideran como limitación la capacidad disponible en los CT, aunque realmente era una restricción enunciada en el problema. Por ello caerían dentro de la denominada **Programación a capacidad infinita**, o simplemente técnicas de **carga infinita** (*Infinite Loading*). Una orientación diferente la constituye la **Programación a Capacidad Disponible finita** (o, simplemente, **técnicas de carga finita** (*Finite Loading*)), en la que las operaciones se programan sin asignar nunca carga por encima de la disponible en el CT; ésta es asignada período a período, obteniéndose un programa detallado para cada trabajo y cada centro. Ello puede hacer variar las fechas previamente planificadas de los pedidos.

Antes de pasar a comentar esta última, quisiéramos decir que la denominación empleada llama a error (ver Plossl-Wight, 1973, pág. 45). El término de capacidad infinita da a entender que se supone una capacidad ilimitada. Sin embargo, esto no es realmente así, pues la consideración de la capacidad disponible se ha realizado en los diversos niveles de planificación de capacidad para el Plan Agregado y Maestro de Producción. Además, si la obtención en su fecha de los pedidos programados implicó carga por encima de la disponible, esto debió ser detectado por CRP tras la Planificación de Materiales; de esa forma, o bien para el período considerado se aumentaron las disponibilidades o bien se modificó dicho Plan. En última instancia, la posible falta de capacidad deberá ser detectada por el Control *Input/Output* (ver Apartado 9.8) varias semanas antes de que se produzca. En definitiva, para la Programación de Operaciones a muy corto plazo sólo quedan los pequeños reajustes de capacidad. Por todo ello, en este enfoque la capacidad disponible se considera como algo **flexible** (no ilimitado), que puede ser ajustado según las circunstancias (al menos en cierta medida).

En el caso de capacidad finita también se tiene en cuenta la limitación, con la diferencia de que, además, aquí se considera **fija**. De hecho, el Programa de Operaciones obtenido con cualquier técnica de secuenciación de las antes descritas (con la consideración de una capacidad disponible inamovible), podría considerarse como de capacidad finita. Si, por el contrario, se han considerado aumentos de capacidad para cumplir las fechas de entrega, estaríamos hablando de capacidad infinita. Es claro, pues, que sería más lógico hablar de **capacidad variable y fija** al distinguir las dos opciones mencionadas.

Aclarado este punto, pasamos a analizar brevemente esta última, que consiste, simplemente, en un simulador de las actividades en el taller para los pedidos en curso y los planificados en el horizonte considerado. En muchos casos, el grado de detalle no sólo alcanza al CT, sino incluso a cada máquina de cada CT. Se van simulando los comienzos y terminaciones de las operaciones en el tiempo (hacia delante o hacia atrás), de acuerdo con la ruta y teniendo en cuenta que la capacidad disponible no se puede aumentar con medidas de ajuste transitorio. El software mencionado puede utilizar Reglas de Prioridad del tipo de las descritas en el epígrafe anterior. No obstante, existen paquetes sofisticados que pueden emplear reglas complejas de ponderación, simulando, por ejemplo, el estudio que haría un planificador y teniendo en cuenta factores como la importancia del cliente, la naturaleza de los CT por los que ha de pasar el pedido, etc.

A continuación, con el orden de prioridades establecido, son programadas las operaciones en los CT o incluso en las máquinas. En esencia, es lo mismo que podría realizarse con el Gráfico de Gantt, sólo que con un mayor grado de detalle. Así, se suele bajar a nivel de máquinas en vez de a CT completos, se suelen coger no sólo los pedidos en curso sino también los que van a emitirse próximamente, se utiliza una evolución hora a hora, etc. Partiendo, pues, de la situación actual, el sistema simula para cada CT lo que ocurre con los trabajos en curso. Seguidamente, cuando determina que un CT ha quedado libre, selecciona el trabajo siguiente a realizar teniendo en cuenta las rutas de los pedidos. Para ello, analiza las prioridades establecidas y los trabajos que tienen que ser realizados a continuación en ese CT o máquina. En algunos casos, simulan incluso cuál sería la fecha de finalización para dichos trabajos. De esta forma, pueden decidir, por ejemplo, si dejar un CT o máquina libre, a la espera de que un trabajo de alta prioridad llegue, o si empezar otro trabajo ya ejecutable al objeto de no dejar ocioso el CT o máquina. Siguiendo así con todos los pedidos, para todos los CT o máquinas, establecen el programa de operaciones que va a desarrollarse durante las diferentes horas de cada día. Esta forma de asignación se denomina **aproximación vertical o por CT**. Existe otra forma de asignación, denominada **de carga horizontal o por pedidos**, en la que se van tomando los pedidos completos por orden de prioridad, asignándose la carga de sus operaciones a todos los CT por los que ha de pasar, en su momento correspondiente.

En la programación de las operaciones no se emplean tiempos medios de espera, sino que se parte de la situación actual, marcando los tiempos necesarios de cola la simulación del desarrollo de las operaciones. Simultáneamente se determinarán los CT donde éstos van a producirse.

Si el software utilizado es sofisticado (por ejemplo, programas CAPOSS, PICS y CLASS de IBM), puede incluir diversos algoritmos para programación y reprogramación automática. En este caso, si se encuentran problemas para cumplir las fechas de entrega o las colas, pueden programarse opciones alternativas (por ejemplo, desarrollar un mismo trabajo simultáneamente en varias máquinas o CT, pasar los items que se vayan concluyendo a la operación siguiente sin esperar la finalización del lote completo, agrupar diversos trabajos de características similares, seleccionar rutas alternativas). Debido a ello, para desarrollar este tipo de combinaciones, la lógica computacional obliga a utilizar diferentes y complejos

algoritmos de cálculo, difícilmente comprensibles para los que no conocen muy a fondo el software. Por dicha causa, el resultado puede ser la obtención de programas en los que no se sabe cómo y por qué han sido generados de una cierta forma.

El programa de operaciones obtenido sólo tendrá validez durante un corto período de tiempo, puesto que siempre hay imponderables que pueden ocurrir. Para evitar que la acumulación de desviaciones haga inservible el programa, es necesaria la reprogramación continuada. Ello puede ser un serio problema, dado que «el método de carga finita puede ocupar diez veces más tiempo de ordenador que el que se invierte en el control de planta con la programación de prioridades» (Vollmann y otros, 1991, pág. 197). A este respecto, «una de las empresas que usa Class en un IBM 360 Modelo 40, requiere 35 horas de ordenador para realizar todos los cálculos y ¡no se pueden obtener 35 horas en un día!» (Plossl y Wight 1973, pág. 59). Aunque la velocidad de los ordenadores ha cambiado notablemente desde el año citado, no cabe duda de que, en los casos complejos, la reprogramación diaria con este tipo de sistemas se vuelve lenta y costosa.

Como se puede apreciar, la carga que un sistema de este tipo genera en los ordenadores, la gran cantidad de información que requiere y lo difícil que puede resultar llevarlo a la práctica e interpretar los resultados que produce, son serios inconvenientes. A ellos podemos añadir además otros problemas adicionales (Plossl-Wight, 1973, págs. 50-60):

- Consideran perfectamente predecible la llegada de las cargas a los CT, lo cual será cierto en pocas ocasiones (tanto menos cuanto más largo sea el período programado).
- Provocan continuas revisiones del PMP.
- No determinan la capacidad necesaria, sino que distribuyen la existente; por tanto, la empresa nunca sabrá si le interesa o no aumentar la capacidad o en qué medida.

Por último, quisiéramos aclarar la consideración de OPT como sistema híbrido, pues este sistema trata los pedidos de forma separada, según hayan de utilizar o no CT cuellos de botella. Estos recursos son programados a capacidad finita, mientras que para los restantes se emplean las aproximaciones de capacidad infinita. Algo similar ocurre con el sistema Q-Control.

9.8. EL CONTROL DE CAPACIDAD

El Control de Capacidad pretende «gestionar y controlar la capacidad de los Centros de Trabajo y reconocer las desviaciones significativas, proporcionando así la información necesaria para tomar las medidas correctoras oportunas» (Belt, 1984, pág. 42). Sólo así se podrán mantener actualizados los factores de eficiencia y utilización y la capacidad disponible, permitiendo desarrollar una planificación de capacidad fiable. Dada, además, la influencia que las colas de espera tienen en los tiempos de suministro de los items fabricados, el control de capacidad resulta básico para su mantenimiento actualizado y, en consecuencia, para una adecuada planificación y control de la producción.

La herramienta más utilizada es, sin duda, el Control[23] o Análisis[24] *input/output*, que es un instrumento para controlar la capacidad desarrollada y las colas en los CT. Para medir estas últimas al final de cada período de tiempo (semana) se utiliza la siguiente expresión (en horas estándar):

Cola final = cola al principio del período[25]
+ carga llegada en el período por pedidos emitidos (*input*) −
− trabajo procesado durante el período (*output*)

Esta cola representa en realidad el inventario final de productos en curso en los Centros de Trabajo (medido en h.e.). Respecto a la gestión de la capacidad, tanto la carga llegada al CT (*input*) como la capacidad desarrollada durante el período (*output*), pueden ser manejadas por la Dirección, al menos en cierta medida. En este sentido, el Control I/O permite establecer la capacidad necesaria y la capacidad disponible en el horizonte del muy corto plazo. El elemento base de esta técnica es el Informe *input/output*, que puede presentarse en diversos formatos. En cualquiera de ellos, deberán tenerse en cuenta cuatro cuestiones (Hablewitz y otros, 1980/81, pág. 42):

- Hay que diseñarlo para que sea un informe de control utilizado con un plan que sea practicable, alcanzable, y con el que los resultados puedan ser comparados.
- Ha de ayudar con la retroalimentación respecto al plan, permitiendo determinar las desviaciones del mismo.
- Deben usarse con un margen de tolerancia para determinar cuándo el Sistema está fuera de los límites de control.
- Es necesario utilizar un número significativo de períodos de tiempo, tanto pasados como futuros.

En la realidad, el informe *input/output* se suele realizar semanalmente para un período futuro de 4 a 12 semanas, dependiendo de la empresa, aunque se pueden acumular cuantos períodos pasados se juzguen necesarios. Los cuatro aspectos mencionados más arriba quedarán claros con el Ejemplo 9.12, en el que seguiremos a Wemmerlöv (1984, pág. 42 y ss.). Respecto al formato de informe (ver Tabla 9.33) hemos empleado el que propone Plossl (1983, pág. 134).

EJEMPLO 9.12. Elaboración del informe *input/output*

Nos apoyaremos en el mismo ejemplo utilizado para el desarrollo de las Reglas de Prioridad, ya utilizado en el Apéndice 5.A. Para mayor comodidad del lector, reproducimos la Tabla 5.17 (aquí 9.30), en base a la cual desarrollaremos el Informe I/O de la Tabla 9.33 para el CT2. Para ello, consideraremos que se realiza al final de la semana 4, abarcando 4 anteriores y 3 futuras.

a) *Input* Planificado (IP)

Si la empresa no dispone de un Plan CRP, podría desarrollar el IP siguiendo un proceso similar al procedimiento detallado (Apéndice 5.A), con dos pequeñas salvedades. En primer lugar, con CRP se asignó la carga generada por un pedido en un CT en el período en que la operación se iba a desarrollar, de forma que si ésta se comenzaba en un período y se terminaba en otro, la carga se repartía entre ambos. En este caso, sin embargo, se trata de determinar la carga planificada que llega al CT, por lo que toda ella se asigna al período en que llega. En segundo lugar, no se considera la carga de los pedidos en curso, dado que éstos son los que conforman la cola final del período anterior, la cual servirá de cola inicial en el actual.

[23] Esta es la denominación más empleada por los diferentes autores (por ejemplo, Vollmann y otros (1991, pág. 151)), Wallace (1984, pág. 14), Hablewitz y otros (1980/1, pág. 42), Browne y otros (1988, pág. 111) o Plossl (1973, pág. 116)).

[24] Ver, por ejemplo, Wemmerlöv (1984, pág. 42).

[25] Es igual a la cola final del período anterior.

Tabla 9.30. Programación hacia delante y cargas en CT para los diferentes tamaños de lote de P1, P2, 112 y 121.

ITEM	P1			P2			112			112			112			121		
Lote a emitir	186			113			135			222			357			264		
Lote a obtener	170			100			113			186			299			226		
Conceptos	CT*k*	Carga	Fecha final	CT*k*	Carga	Fecha final	CT*k*	Carga	Fecha final	CT*k*	Carga	Fecha final	CT*k*	Carga	Fecha final	CT*k*	Carga	Fecha final
Comienzo			0			0			0			0			0			0
Confec. del pedido			0,47			0,47			0,47			0,47			0,47			0,47
Desplazamiento	CT3 (O1)		0,59	CT3 (O4)		0,52	CT1 (O7)		0,54	CT1 (O7)		0,54	CT1 (O9)		0,54	CT2 (O9)		0,56
Cola en CT*k*			1,32			1,25			0,91			0,91			0,91			1,18
Preparación *Oi*		1	1,5		1	1,44		1	1,03		1	1,03		1	1,03		1	1,33
Ejecución *Oi*		15,5	4,34		9,42	3,16		11,25	2,41		18,5	3,3		29,5	4,68		8,8	2,69
Desplazamiento	CT2 (O2)		4,46	CT2 (O5)		3,28	CT2 (O8)		2,47	CT2 (O8)		3,36	CT2 (O8)		4,74	CT1 (O10)		2,78
Cola en CT*k*			5,08			3,9			3,08			3,97			5,35			3,27
Preparación *Oi*		1	5,23		1	4,05		1	3,24		1	4,13		1	5,5		1	3,2
Ejecución *Oi*		2,94	5,69		4,47	4,74		10,12	4,79		16,65	6,69		26,77	9,62		4,68	3,84
Desplazamiento	CT3 (O3)		5,81	CT3 (O6)		4,86	CT1 (O9)		4,85	CT1 (O9)		6,75	CT1 (O9)		9,68			
Cola en CT*k*			6,54			5,59			5,22			7,11			10,05			
Preparación *Oi*		1	6,72		1	5,77		1	5,34		1	7,24		1	10,17			
Ejecución *Oi*		4,32	7,51		0,85	5,93		8,64	6,4		14,21	8,98		22,85	12,97			
Espera			7,57			5,99			6,64			9,03			13,03			3,9
Inspección			8,04			6,46			6,93			9,51			13,5			4,37

Actuando de esta forma, a partir de la planificación de materiales que se hizo al final del momento cero (Tabla 5.6), habríamos obtenido, para las tres primeras semanas del Horizonte de Planificación, el *input* planificado de la primera fila de la Tabla 9.31. Este coincide con la carga para los Pedidos Planificados calculada por CRP (Tabla 5.18), que no incluye la de los pedidos en curso, salvo en los períodos 3 y 4, correspondientes a la operación 8 del pedido de 222 unidades de 112 que se comentó como ejemplo; allí se repartió la carga entre 3 y 4, y aquí se asigna por completo al período 3.

Si **la empresa dispone del Plan CRP**, éste servirá de *input* planificado, considerando que el correspondiente al primer período (el 1 para la realizada al final del momento 0), sería la carga calculada por CRP para dicho período menos la Cola de Espera que determina el Informe de Producción realizado a final del período 0 (el problema de distribución de la carga, antes comentado, quedará atenuado cuando, posteriormente, se realice la media para varios períodos). De esta forma, se determinará el *input* planificado al final de cada período, tras la reprogramación.

En nuestro caso, para las tres semanas futuras que abarca el informe, supondremos que los calculados a final de los períodos 1, 2, 3 y 4 (tras las reprogramaciones de materiales) son los que aparecen en las filas 2, 3, 4 y 5 de la Tabla 9.31. No obstante, es conveniente realizar una consideración adicional sobre el *input* así determinado. El motivo es que, como en CRP se ha trabajado con valores medios, la evolución real de las llegadas de la carga puede diferir algo de la planificada. Por ello, es mejor nivelar el *input* planificado promediándolo para varios períodos futuros; por este motivo, los *inputs* planificados del informe (Tabla 9.33), no coinciden con los de la Tabla 9.31. Puesto que estamos ahora a final del período 4, y tomando los *inputs* planificados en ese momento (Tabla 9.31) y utilizando, para realizar el promedio, los tres períodos próximos (5, 6 y 7), la carga media calculada es de 22,1 h.e. Esta será la que se tomará para cada uno de estos tres períodos, en lugar de las planificadas. Como es lógico, igual se hizo en su momento para los *inputs* planificados a final de cada uno de los períodos anteriores, por lo que los que se emplearon en cada caso para el informe, son los que constan en la Tabla 9.32; de ahí el *input* planificado que aparece en el informe de la Tabla 9.33.

b) *Input* real

Se trata de la cantidad de trabajo que realmente ha llegado a los centros. Para el caso de nuestro ejemplo, hemos considerado los valores hipotéticos de *input* real que se reflejan en la Tabla 9.32.

c) Desviaciones acumuladas

Son la diferencia, por período, de la carga planificada menos la real, más la desviación acumulada en el período anterior. La desviación acumulada media se calcula dividiendo la desviación acumulada por el número de períodos que la han originado. Esta fila nos indica si hay tendencia a que el *input* real evolucione por encima o por debajo del planificado; en nuestro caso, se observa una tendencia a que la realidad sobrepase algo a lo planificado, dado que los valores medios van disminuyendo.

Tabla 9.31. *Input* planificado calculado al final de cada período

Períodos		1	2	3	4	5	6	7
Final del período:	0	0	11,12	36,86				
	1		11,12	27,06	20,92			
	2			27,06	9,8	30,33		
	3				20,92	13,74	43,03	
	4					19,21	27,77	19,21

Tabla 9.32. *Input* planificado promedio para el informe *input/output* realizado al final de cada período

Períodos		1	2	3	4	5	6	7
Final del período:	0	16	16	16				
	1		19,7	19,7	19,7			
	2			22,4	22,4	22,4		
	3				25,9	25,9	25,9	
	4					22,1	22,1	22,1

Tabla 9.33. Informe *input/output*

Semana	1	2	3	4	5	6	7
Input planificado	16	19,7	22,4	25,9	22,1	22,1	22,1
Input real	0	15,06	23,12	26,36			
Desviación acumulada	+16	+20,64	+19,92	+19,46			
Desviación acumulada media	16	10,32	6,64	4,865			
Output planificado	32,5	32,5	32,5	32,5	32,5	32,5	32,5
Output real	31	16,18	20	29,48			
Desviación acumulada	1,5	17,85	30,35	33,37			
Desviación acumulada media	1,5	8,925	10,11	8,34			
Cola planificada	15,62	0	0	0	0	0	0
Cola real (32,12)	1,12	0	3,12	0			
Capacidad sobrante		11,68	10,11	3,48	10,14	10,14	10,14

d) *Output* planificado

Se trata de la capacidad a desarrollar (en h.e.) planificada para los diferentes períodos en el CT. Esta es una decisión de la Dirección y puede ser variada a muy corto plazo mediante las conocidas medidas de ajuste transitorio. Recordemos que, en nuestro caso, se planificaron 32,5 h.e. semanales de capacidad disponible.

e) *Output* real

Son registros de la capacidad realmente desarrollada en el CT durante los períodos pasados. No se trata de las h.e. agotadas, sino de las que proceden de los diferentes items que han sido elaborados (sumatorio del número de items elaborados × número h.e. por unidad, más el correspondiente tiempo de preparación). Supongamos que, en nuestro caso, fueron las que constan en la Tabla 9.33, en la que se observa el efecto de una avería que sólo permitió desarrollar 20 h.e. en la tercera semana.

f) Desviación acumulada y acumulada media del *output*

La forma de cálculo es la misma que para el *Input*. Obsérvese que la desviación acumulada es creciente y la media, a partir de la semana 2, se mantiene entre 8,34 y 10,11 h.e. Ello muestra que existe capacidad sobrante en estos períodos, cosa que ya pudimos ver en la interpretación de resultados del Plan CRP (Tabla 5.20).

g) Cola planificada y capacidad sobrante

Se trata de la evolución de la cola del CT, según la carga y la capacidad desarrollada planificada. Para cualquier período pasado y para el actual, se calcularía sumando a la cola real del período anterior la diferencia entre el *input* planificado y el *output* planificado. Al ser recalculada semanalmente la cola planificada sobre la real de la semana anterior, se evita la acumulación de errores debido a las divergencias entre planificación y realidad. Para los períodos futuros (5 a 7), se calcularía sobre la cola planificada del período anterior, dado que aún no se conoce la real.

Si la diferencia señalada (*input* planificado-*output* planificado) diera un valor inferior a cero, éste sería **capacidad sobrante** y la Cola de Espera será cero.

h) Cola real

Se trata de la cola que realmente tiene el CT, que al final del período 0 era de 32,12 h.e. Se calcula semanalmente sumando a la cola real del período anterior la diferencia entre el *Input* y el *Output* real; el resultado, como es lógico, nunca podrá dar un valor inferior a cero. En nuestro ejemplo, éste se mantiene en valor cero, y así ocurrirá en el futuro próximo. Realmente, el CT está sobrado de capacidad; si la Cola Objetivo (ver Cuadro 2.1), es de 10 h.e., es evidente que habrá de reducirse la capacidad o aumentarse la carga; no obstante, habría que considerar la evolución que pueda sufrir a partir del período 7, para lo cual se pueden analizar las desviaciones del Plan CRP (Tabla 5.20).

Como se puede apreciar por lo expuesto, el análisis *input/output* es, de un lado, un vehículo para conocer y analizar los flujos de entrada y salida de un CT concreto, obteniéndose la situación y evolución de la cola de espera, y, de otro, un instrumento de planificación conectado con la gestión de la capacidad a corto y muy corto plazo[26].

Aparte de estas consideraciones, es conveniente resaltar otra cuestión interesante: la *medición del tiempo de cola componente del Tiempo de Suministro (TS) de cada CT*. El cociente entre la cola y el *output* planificados proporciona, período a período, el tiempo que tendría que esperar un trabajo para que la preparación de la operación comenzara en ese centro. Este tiempo puede servir para ajustar el TS, para replanificar los pedidos (en base a los valores que éstos van a tomar con estos tiempos de cola) y la capacidad. El cociente para los períodos pasados entre cola y *output* reales puede ser de gran ayuda para la corrección del TS; de hecho, «un Control *input/output* efectivo debería lograr que el TS real medio fuese igual al usado cuando son hechos los programas» (Dilworth, 1993, pág. 317).

Por último, decir que un eficiente control de colas facilitaría una alta utilización de los CT y, además, evitaría que los niveles de producción en curso fuesen excesivos, ayudando a mantenerlos dentro de unos límites adecuados.

[26] De hecho, ha habido autores (Belt, 1976, pág. 15 y ss.) que han intentado condensar con este análisis planificación y control de capacidad, basándose en que la situación ideal es poner de acuerdo *output* e *input* planificado, manteniendo constante la cola en su objetivo.

9.9. CONSIDERACIONES SOBRE LAS EMPRESAS DE SERVICIOS

Gran parte de lo expuesto hasta aquí es igualmente válido para las empresas de servicios, donde también existirán colas de espera (para la recepción del servicio por parte del cliente). Basta para ello que, en lugar de talleres, máquinas o Centros de Trabajos, pensemos en equipos (por ejemplo: de limpieza), áreas o secciones (por ejemplo: quirófanos de un hospital), elementos de transporte (por ejemplo: en una aerolínea), etc. No obstante, como ya se ha comentado en el Capítulo 3, existen ciertas características específicas a considerar en el caso de las empresas de servicios: la imposibilidad de almacenarlos, la naturaleza aleatoria e irregular de la demanda, o que sea frecuente que el equipo (personas, máquinas, etc.) vaya al cliente (trabajo) en vez del trabajo al equipo. Estas características dificultan el ajuste entre el flujo de clientes y la capacidad. Aunque la primera característica es ineludible y la tercera difícil de evitar, en algunos casos, la aleatoriedad de la demanda puede ser atenuada (especialmente en este horizonte de muy corto plazo) mediante el uso de algunos procedimientos ya muy extendidos. Entre ellos:

- **Citas previas**, muy empleado en hospitales y consultas médicas, talleres, bufetes de abogados, etc. Sin embargo, la impuntualidad del cliente, o la variabilidad del tiempo requerido para la prestación del servicio, son aspectos que deben tenerse muy en cuenta.
- **Reserva previa**, que permite hacer una previsión más exacta de la demanda para un período dado y, con ello, el establecimiento de una fecha más exacta de prestación del servicio y un menor retraso en la misma. Su uso está ya muy extendido en hoteles, aerolíneas, restaurantes, etc. Al igual que en el caso anterior, es necesario evitar que la impuntualidad desorganice la programación.

Sistemas como los mencionados pueden, sin duda, atenuar la irregularidad de la demanda y nivelarla a corto plazo. Sin embargo, hay empresas que no pueden emplear estas opciones (por ejemplo, una gasolinera, un supermercado, el servicio de urgencias de un hospital, etc.). En otras ocasiones es necesario, además, coordinar el uso de varios recursos, en cuyo caso el problema se complica notablemente. Por ejemplo: el equipo de cirugía, el quirófano, la sala de recuperación y la cama en planta para el posoperatorio de un hospital; los diferentes servicios (eléctrico, mecánico, chapa y pintura, etc.) de un taller de reparación de automóviles.

A veces, la complejidad aumenta si hay que considerar otra serie de restricciones adicionales. Tal es el caso de las aerolíneas, en que hay que realizar la programación coordinada de tripulaciones, aviones, servicio de equipajes, personal de tierra, transporte y escalera de abordaje, personal de mantenimiento, etc. y, además, cumplir las normativas sobre máximo número de horas de vuelo de los pilotos, normas de mantenimiento, etc. Realmente no existen soluciones globales para programar todos los recursos de la empresa de servicios. Salvo en el caso citado de las compañías aéreas, que cuentan con soluciones informatizadas *on-line* desarrolladas a medida y de amplia difusión entre ellas[27], en la mayoría de los casos se trabaja intentando dar soluciones parciales al problema.

[27] Ver, por ejemplo, Subramanian y otros (1994), que describe el modelo Coldstart, empleado en Delta Airlines para programar 2.500 vuelos diarios, con unos 450 aviones agrupados en 10 flotillas. Sólo recientes desarrollos en los algoritmos de programación matemática y en informática han hecho posible resolver problemas de optimización de dicho tamaño. Se espera que el modelo mencionado ahorre a la compañía unos 300 millones de dólares en los próximos tres años.

En otros casos será imposible, inapropiado y/o innecesario intentar programar detalladamente las operaciones de una serie de trabajos, optándose frecuentemente por ajustar la disponibilidad de los recursos (materiales, personal, etc.) de acuerdo con la llegada de los trabajos, con el objetivo de minimizar los costes totales (procedentes de las esperas y de la capacidad del sistema). La Teoría de Colas (ver Anexo a Parte I) podría ser empleada en muchos de estos casos (por ejemplo, reducción de listas de espera de un hospital o del *overbooking* de una línea aérea).

Con gran frecuencia, el personal es la base de la prestación del servicio, por lo que se intenta programar dicho recurso para ajustarlo a las necesidades de demanda o al Plan de Personal si éste existe (ver Capítulo 3) (por ejemplo, el personal del servicio de mantenimiento de parques y jardines). En otras ocasiones, el personal no es la única base de la prestación del servicio, pero también es crítica su programación; a falta de soluciones integradas que abarquen todos los recursos aquél es programado aparte (por ejemplo: enfermeras y personal auxiliar de un hospital). Para todo ello pueden emplearse técnicas similares a las de prueba y error descritas en el presente capítulo para la asignación (o en el Capítulo 3), técnicas heurísticas como el método de los índices o incluso optimizadoras basadas en programación lineal o por objetivos[28] y de simulación. En muchas ocasiones, habida cuenta de que la jornada de los trabajadores es constante, bastará determinar los días de descanso que habrá de tomar el personal[29].

También el Gráfico de Gantt, por ejemplo, puede ser muy útil para coordinar los programas o actividades a desarrollar por un conjunto de equipos de trabajo o de ciertas máquinas o instalaciones a emplear, para la prestación del servicio (equipos de cirujanos de un hospital, una serie de coches de alquiler, etc).

En otras ocasiones (por ejemplo: la programación coordinada de los diferentes servicios de un hospital), podría acudirse a las mismas aproximaciones que se han utilizado en Job-Shop (el paciente a ser operado tiene una secuencia de paso por el quirófano, sala de recuperación, etc.; hay múltiples trabajos o tipos de intervenciones, con unos tiempos estimados medios, etc.). Podrían seguirse reglas de prioridad, como la urgencia en la intervención. Igual podría ocurrir con los diferentes servicios de un taller, donde la regla de prioridad podría ser primera entrada-primera salida. Hay también algunos casos de servicios estandarizados, que podrían programarse como en el caso de la producción en línea antes descrito. Por ejemplo, para los servicios de comidas rápidas o para una empresa de transportes.

No obstante, es claro que, salvo casos muy concretos (como el citado de las aerolíneas, o el de las firmas que sólo han de preocuparse del personal), la programación de operaciones en empresas de servicios está menos avanzada que en empresas manufactureras, debido a las condiciones citadas al principio y a la gran variedad de este tipo de empresas, ampliamente condicionadas por el cliente. Todo ello hace que sea muy difícil establecer una agrupación en base a sus características, como hemos podido hacer con las manufactureras, y plantear soluciones más o menos estándares al problema. Teniendo en cuenta las bases que acabamos de describir, en muchas ocasiones no quedaría más remedio que acudir al desarrollo de técnicas concretas al caso, desarrollando un modelo particular (son muchos los casos abordados mediante programación matemática o, más frecuentemente, mediante simulación informatizada).

[28] Ver, por ejemplo, Heizer-Render (1991, pág. 676 y ss.).

[29] Existen diversos métodos desarrollados para ello. Ver, por ejemplo, los propuestos por Krajewski-Ritzman (1990, pág. 632 y ss), Tibrewala-Philippe-Browne (1972, págs. 71 a 75), o Aquilano-Chase (1991, pág. 14 y ss.).

9.10. CONSIDERACIONES FINALES: DISEÑO DEL SUBSISTEMA DE PLANIFICACION Y CONTROL A MUY CORTO PLAZO

Como se ha podido apreciar a lo largo de la exposición, son muchas e importantes las actividades a desarrollar en el nivel de planificación y control a muy corto plazo y muchas también las técnicas y formas que pueden ser empleadas para desarrollarlas. Por ello, hemos considerado conveniente concluir haciendo algunas reflexiones sobre los aspectos básicos que van a influir en el diseño de las mismas en cada caso contreto. A este respecto, tres son los factores fundamentales a tener en cuenta (Vollmann y otros, 1991, pág. 218 y ss.):

- La posición estratégica de la empresa en el mercado.
- El volumen y tipo de la capacidad disponible para hacer frente al Plan de Materiales.
- La naturaleza y complejidad de los productos y de sus procesos.

Las prioridades competitivas de la empresa (ver J. A. D. Machuca y otros, 1994, Capítulos 2 y 3) van a ser fundamentales para definir los objetivos operativos del subsistema y el diseño de sus actividades. Por ejemplo, si el nivel de servicio es una meta fundamental, habrá que conseguir un sistema preciso con un objetivo básico de cumplimiento de fechas de entrega e incremento de la rapidez. Si, por el contrario, el precio tiene una mayor prioridad, habrá que insistir en una eficiente utilización de los recursos productivos[30]. En general, dado que las prioridades competitivas suelen ser múltiples, se tenderá a conseguir un diseño que busque un equilibrio en la consecución de las mismas en función de su importancia relativa.

El segundo factor está íntimamente relacionado con el primero, que marcará la gestión de la capacidad, la cual establece la capacidad disponible en cada momento. Por ejemplo, proporcionar altos niveles de servicio a clientes conllevará capacidad sobrante o capacidad flexible; para evitar la ociosidad de recursos y el consiguiente incremento de costes, es conveniente un sistema que permita una alta flexibilidad en la utilización de la capacidad disponible y no requiera utilizar altos niveles de capacidad. En ocasiones, puede que la empresa disponga de una capacidad sobrante en relación con su demanda, en cuyo caso no es tan necesario un sistema sofisticado y preciso. Otras veces la capacidad disponible será difícilmente variable si no es con inversiones a medio o largo plazo, por lo que interesa utilizar sistemas de carga finita.

Por último, el diseño de los productos y procesos constituye un importante condicionante[31]. Cuestiones como la flexibilidad de los procesos, la velocidad de fabricación, el grado en que los productos impliquen secuencias similares de procesamiento, la complejidad de los procesos, etc., van a condicionar la posible utilización de rutas alternativas, de solapamientos o desdobles de pedidos, etc., medidas que influyen en la flexibilidad de las decisiones de planificación y control a muy corto plazo.

[30] En relación con este aspecto, no olvidar lo expuesto en el Capítulo 8.

[31] Ver J. A. D. Machuca y otros (1994, Capítulos 4, 5, 6, 9, 10, 11 y 12).

REFERENCIAS Y BIBLIOGRAFIA

ADAM, E., y EBERT, R.: «Production and operations management. Concept, models and behavior». Prentice Hall, 1992.

AQUILANO y CHASE.: «Fundamentals of operations management», Richard D. Irwin, Inc., 1991.

BELLMAN, R.: «Dynamic programming traitment of the travelling salesman problem», *Journal Assoc. for Computing Machinery*, vol. 9, 1962.

BELT Y BILL: «Input/Output planning illustrated», *Produc-tion and Inventory Management*, Segundo trimestre, 1978.

BOWMAN, E. H.: «The schedule sequencing problem», *Operations Research*, vol. 7, sept/oct, 1959.

BROWNE, HARHEM y SHIVNAN: «Production management systems: A CIM perspective», Addison-Wesley Publishing Co, 1988.

CAMPBELL, H. G.: «A heuristic technique for near optimal production schedule», MS Thesis. Texas Technological College, 1966.

DÍAZ, A.: «Producción: gestión y control», *Ariel*, 1994.

DÍEZ DE CASTRO, E.: «Producción industrial. Modelos de secuencias», Publicaciones de la Universidad de Sevilla, 1982.

DILWORTH, J. B.: «Production and operations management. Manufacturing and services», *McGraw-Hill*, 1993.

FOX y SMITH: «ISIS: A knowledge-based system for factory scheduling», *Expert Systems*, julio 1984.

GAITHER, N.: «Production and operations management», Dryden Press, 1992.

GREENBERG, H.: «A branch and bound solution to the general scheduling problem», *Operations Research*, vol. 16, núm. 2, 1968.

HABLEBITZ y otros: «Shop floor controls visual aid master. APICS training aids», APICS, 1980/81.

HABLEBITZ y otros: «Shop floor controls. APICS training aids», APICS, 1980/82.

HEIZER, J., Y RENDER, B.: «Production and operations management», Allyn and Bacon, 1991.

HELD y KARP: «A dynamic programming approach to sequencing problem», *SIAM*, 10, 1962.

IGNALL y SCHARAGE: «Applications of the Branch and bound technique to some flow shop scheduling problem», *Operations Research*, vol. 13, 1965.

JOHNSON, S. M.: «Optimal two-stage and three-stage production schedules with setup times included», *Naval Research Logistics Quarterly*, marzo 1954.

KAUFFMANN, A.: «Métodos y modelos de la investigación de operaciones», CECSA, vol. II, 1972.

KRAJEWSKI y RITZMAN: «Operations management. Strategy and analysis», Addison-Wesley, 1990.

LIN, S.: «Computer solution of the travelling salesman problem: A survey», *Bell Systems Tech*, 44, enero 1965.

LOMNICKI, Z. A.: «A branch and bound algorithm for the exact solution of three machine scheduling problem», *Operations Research*, vol. II, 6, 1963.

LYMAN, J.: «Manufacturing», *Electronics*, octubre 1986.

MANNE, A. S.: «On the job shop scheduling problem», *Operations Research*, vol. 8, 1970.

MACHUCA y otros: «Dirección de Operaciones. Aspectos estratégicos en la producción y los servicios», McGraw-Hill, 1994.

MARSCH, C. A.: «MARS-An expert system using the automated reasoning tool to schedule resources». En *Robotics and Expert Systems*. Proceedings of Robex's 85, Instrument Society of America.

MEREDITH, J. R.: «The management of operations: a conceptual emphasis», John Wiley & Sons, 1992.

PLOSSL, G. W.: «Manufacturing control. The last frontier for profits», Reston Publishing Co, 1973.

PLOSSL, G. W.: «Production and inventory control applications», George Plossl Educational Services, 1983.

PLOSSL y WIGHT: «Capacity planning control», *Production and Inventory Management*, Tercer trimestre, 1973.

PRESBY y WOLFSON: «An algorithm for solving job sequencing problems», *Management Science*, vol. 13, 8, 1967.

REITHER y SHERMAN: «Discrete optimizing», *SIAM*, 13, 1965.

SANDMAN, W. E.: «How to win productivity in manufacturing», *Yellow Book of Pennsylvania*, 1980.

SCOTT, B.: «Manufacturing planning systems», McGraw-Hill, 1994.

STARR, M. K.: «Managing production and operations», Prentice Hall, 1991.

STEVENSON, W. J.: «Production/Operations management», Richard D. Irwin, 1990.

SUBRAMANIAN, R.; SCHEFF, R. P.; QUILLINAN, J. A.; WIPERS, S., y MARSTEN, R.: «Coldstart: fleet assignment at Delta airlines», *Interfaces*, 24, 1, enero 1994.

TIBREWALA, PHILIPPE y BROWNE: «Optimal scheduling of two consecutive idle periods», *Management Science*, vol. 19, 1, 1972.

VOLLMANN, BERRY y WHYBARK: «Sistemas de planificación y control de la fabricación (vol. 1)», *Tecnologías de Gerencia y Producción*, 1991.

VOLLMANN, BERRY y WHYBARK: «Manufacturing planning and control systems», *Dow Jones-Irwin/APICS Series in Production Management*, 1988.

WALLACE: «APICS dictionary». APICS, 1984.

WEMMERLEV, U.: «Capacity management techniques», APICS, 1984.

CAPITULO 10

PLANIFICACION, PROGRAMACION Y CONTROL DE PROYECTOS

10.1. INTRODUCCION

La planificación y programación de proyectos complejos, sobre todo grandes proyectos unitarios no repetitivos, comenzó a ser motivo de especial atención al final de la Segunda Guerra Mundial, cuando se difundió el Gráfico de Gantt (ver Apartado 9.5.2.1). Hasta finales de los cincuenta ésta fue la única herramienta que se tenía; en esta época, la Oficina de Proyectos Especiales de la Marina de los Estados Unidos de América, en colaboración con la Lockheed (fabricantes de proyectiles balísticos) y la Booz, Allen & Hamilton (ingenieros consultores), se plantean un nuevo método para solucionar el problema de planificación, programación y control del proyecto de construcción de submarinos atómicos armados con proyectiles «Polaris», donde tendrían que coordinar y controlar, durante un plazo de cinco años a 250 empresas, 9000 subcontratistas y numerosas agencias gubernamentales. En julio de 1958 se publica el primer informe del programa, al que denominan *Programme Evaluation and Review Technique* (PERT, Teoría de Evaluación y Revisión de Programas), decidiendo su aplicación en octubre del mismo año y consiguiendo un adelanto de dos años sobre los cinco previstos.

También en 1958, el equipo de investigación de la compañía *Du Pont*, de Nemours, dirigido por J. E. Kelley y M. R. Walker, crea una técnica, similar al PERT, a la que denominan *Critical Path Method* (CPM, Método del Camino Crítico), con la que consiguen espectaculares resultados en la empresa. Este método es muy parecido al PERT su diferencia fundamental es la nomenclatura (lógico si se tiene en cuenta que son resultados de investigaciones independientes) y que, posteriormente, J. E. Kelley introdujo una relación entre el coste y la duración de las actividades (ver Apartado 10.7), cosa que el PERT no tenía en cuenta, al estimar la duración de las actividades para un nivel de coste dado. Por otra parte, mientras que CPM trabaja con duraciones deterministas para las tareas el PERT, más centrado en los aspectos temporales, utiliza estimaciones probabilísticas para aquéllas (ver Apartados 10.4 y 10.5). Sin embargo, como decíamos anteriormente, ambos métodos son muy similares y, a efectos docentes, suelen presentarse de forma combinada. Expuestas las diferencias básicas, y dado que las características de ambos sistemas pueden emplearse conjuntamente, no haremos distinción entre los mismos a lo largo del presente capítulo y utilizaremos, en general, la denominación de PERT.

Paralelamente a las investigaciones mencionadas, B. Roy desarrolló en Europa el *método de los Potenciales* (conocido como grafo **ROY**), en el que, al igual que en las técnicas anteriores, la idea básica es la interdependencia entre las distintas actividades que componen el proyecto, así como la determinación del *camino crítico* (ver Apartado 10.4). Frente al PERT y al CPM, este método tiene como ventaja la mayor flexibilidad para simular la interrelación existente entre las actividades. Durante los años siguientes se desarrollaron nuevas técnicas de programación que, en la mayor parte de los casos, sólo perfeccionan las anteriormente expuestas.

Todos los métodos mencionados se basan en los grafos; muy resumidamente, y prescindiendo de formalismos matemáticos, un grafo se puede definir utilizando dos conjuntos (ver Figura 10.1). El primero, que denominaremos V, representa n puntos del plano, llamados *vértices*; el segundo, R, representa las *relaciones* que existen entre los elementos de V, siendo su símbolo un arco que une los dos vértices relacionados. El arco R_{ij}, que une los vértices V_i y V_j, irá desde el primero al segundo, indicando, pues, la relación y sentido de la misma.

En los apartados siguientes comentaremos el empleo de los grafos para la planificación, programación y control de proyectos.

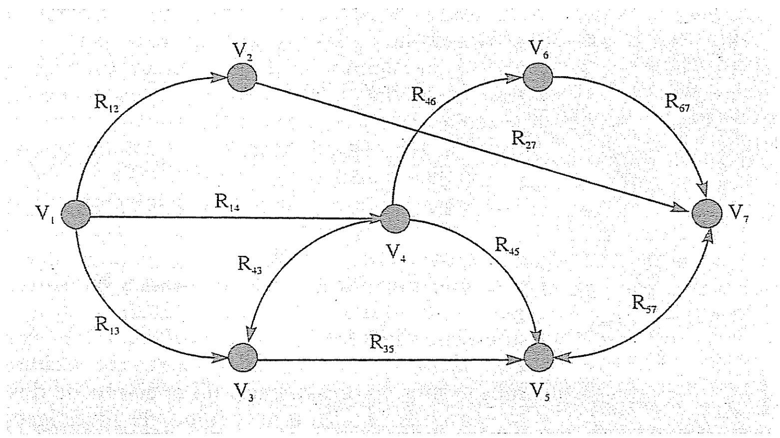


Figura 10.1. Representación de un grafo.

10.2. PRINCIPIOS BASICOS DEL METODO PERT

El PERT no es una metodología pasajera (como se ha dicho alguna vez) y su difusión ha sido enorme en todo el mundo. En Estados Unidos, la Administración Pública sólo considera ofertas de empresas privadas que se presenten diseñadas siguiendo esta técnica; el proyecto Apolo, que permitió que el hombre pusiera el pie en la Luna, también fue programado mediante PERT. Con este método se comienza descomponiendo el proyecto en una serie de actividades (ver también Apartado 10.11), entendiendo por **actividad** la *ejecución de una tarea que necesita para su realización la utilización de uno o varios recursos* (mano de obra, maquinaria, materiales, etc.), *considerando como característica fundamental su duración.* Así, por ejemplo, la cimentación, la instalación eléctrica, el montaje de puertas, etc., son actividades de un proyecto de construcción de un edificio. La representación gráfica de las tareas se realizará mediante arcos.

Otro concepto fundamental es el **suceso** (también conocido como etapa, nudo o acontecimiento), que representa *un punto en el tiempo*; no consume recursos y sólo indica el principio o fin de una actividad (o de un conjunto de actividades). Se suele representar mediante un círculo. Se entenderá por **suceso inicial** del proyecto aquel que represente el comienzo de una o más actividades, pero no la terminación de ninguna (ver suceso a en la Figura 10.4); igualmente, el **suceso final** del proyecto será el que, representando la finalización de una o más actividades, no sea comienzo de ninguna otra (ver suceso k en la Figura 10.4). Todos los sucesos del grafo, exceptuando el suceso inicial y el final, tendrán un doble significado; serán el suceso final de todas las actividades que lleguen a él y, además, serán el inicio de todas las que salen del mismo. De esta forma, para que comience cualquier actividad del grafo, tendrán que haber finalizado todas las que llegan al suceso que marca su inicio. Dado que los sucesos se identifican por números, la actividad que une dos sucesos , «*i*» y «*j*», se representa por dichos números (en este caso, actividad «*ij*»).

10.3. CONSTRUCCION DE UN GRAFO PERT

En el caso del grafo PERT, los vértices serán los sucesos y los arcos las actividades, debiendo cumplirse una serie de condiciones:

- El grafo sólo tendrá un suceso inicial y otro final.
- Toda actividad, a excepción de la que salga del suceso inicial o llegue al suceso final, tendrá, al menos, una actividad precedente y otra siguiente.
- Toda actividad ij llegará a un suceso de orden superior al del que sale ($i < j$).
- No podrán existir dos actividades que, teniendo el mismo suceso inicial, tengan el mismo suceso final, o viceversa.

La primera condición obliga a que, tanto el comienzo del proyecto como el final del mismo, sean únicos; así, por ejemplo, si un proyecto puede comenzar con la realización de varias actividades simultáneamente, todas ellas saldrán del suceso inicial. La segunda, una vez cumplida la primera, implica que cualquier actividad representada en el grafo formará parte de un **camino** que comenzará en el suceso inicial y terminará en el final. En estos caminos no existirán retornos, ya que, implícitamente, esa es la condición impuesta en tercer lugar. La cuarta impide que dos actividades distintas tengan la misma denominación (ver caso 5 de la Figura 10.2).

Algunas veces, el cumplimiento de las citadas reglas puede impedir el plantear las relaciones de prelación de algunas actividades. Cuando ello sucede, se recurre al empleo de **actividades ficticias**; éstas no consumen tiempo ni ningún tipo de recurso, siendo su única finalidad resolver los problemas de dependencia mencionados. Su empleo queda ilustrado en los ejemplos de la Figura 10.2.

Para comenzar a construir el grafo se parte del conocimiento de todas las actividades que componen el proyecto, así como de sus relaciones de prelación. Es muy conveniente recoger esta información de una forma sistematizada, ya que ello ayudará en gran medida a construir el grafo (ver Ejemplo 10.1). Existen, básicamente, dos formatos para esto, la **matriz de encadenamientos** (C. Romero, 1983, pág. 31) y **la tabla de precedencias** (J. A. D. Machuca y otros, 1990, pág. 324).

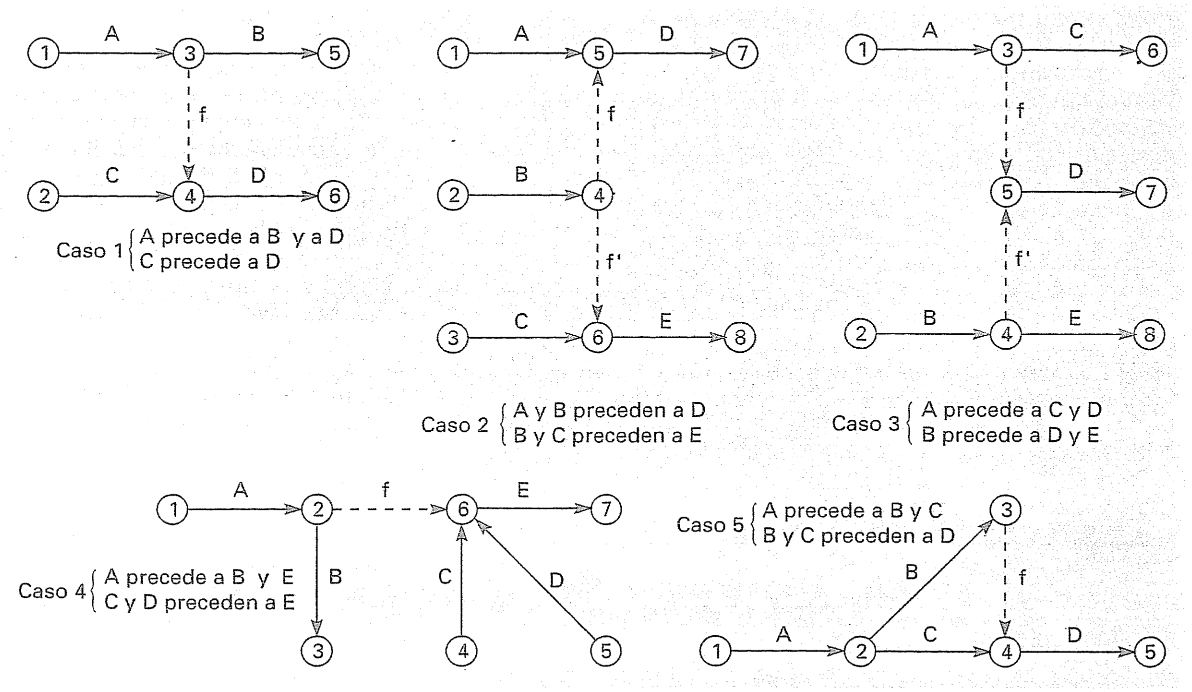


Figura 10.2. Algunos casos de generación de actividades ficticias (*f* y *f'*).

Esta última, empleada en el Ejemplo 10.1, es una tabla de tres filas, apareciendo en la central todas las actividades que intervienen en el proyecto. Para cada una de éstas, la primera y tercera indican aquellas que se realizan inmediatamente antes y después. Construido el grafo a partir de alguno de los formatos mencionados, se pasa a numerar los sucesos, de tal forma que cumpla la tercera condición impuesta para el mismo. Para ello se podría hacer una *ordenación del grafo en niveles* (C. Romero, 1983, pág. 35), utilizar el *método de los cortes* (J. A. D. Machuca y otros, 1990, pág. 325), o bien el de la *matriz asociada al grafo*, que es básicamente igual al anterior, pero más sistematizado (ver Ejemplo 10.1).

EJEMPLO 10.1. Construcción de un grafo PERT

Para la realización de un determinado proyecto es necesaria la ejecución de 14 actividades (*A*, *B*, ..., *M* y *N*), que tienen las siguientes relaciones de prelación inmediata:

- Para que comience *D* tienen que estar finalizadas *A* y *B*.
- Sólo una vez finalizada *B* podrán comenzar *E* y *F*.
- *C* es inmediatamente anterior a *G*.
- Para comenzar las actividades *H*, *I*, *J*, *K*, *L* y *M* se tendrá que haber finalizado la *D*.
- Sólo cuando se terminen *E*, *F* y *G* se podrá dar comienzo a *J* y *K*.
- Para la realización de *I* es totalmente imprescindible la finalización de *E*.
- La ejecución de *N* no se podrá llevar a cabo mientras no se hayan terminado las actividades *H*, *I*, *J*, *K* y *L*.

De acuerdo con lo anterior, se pasa a realizar la **tabla de precedencias** (Tabla 10.1). En ella, la fila central

Tabla 10.1. Tabla de precedencias

Tareas inmediatamente anteriores				*A*, *B*	*B*	*B*	*C*	*D*	*D*, *E*	*D*, *E*, *F*, *G*	*D*, *E*, *F*, *G*	*D*	*D*	*I*, *J*, *K*, *L*, *H*
Tareas	*A*	*B*	*C*	*D*	*E*	*F*	*G*	*H*	*I*	*J*	*K*	*L*	*M*	*N*
Tareas inmediatamente siguientes	*D*	*D*, *E*, *F*	*G*	*H*, *I*, *J*, *K*, *L*, *M*	*I*, *J*, *K*	*J*, *K*	*J*, *K*	*N*	*N*	*N*	*N*	*N*		

muestra las distintas actividades del proyecto. La casilla superior de cada tarea es el conjunto de actividades que llegan al suceso comienzo de la misma; de igual forma, las de la casilla inferior son las que saldrían del suceso final de dicha actividad.

La Tabla 10.1 se utiliza para dibujar el grafo, comenzando por aquellas que no tienen precedentes (*A*, *B*, *C*) y que, por tanto, saldrán del nudo inicial (Figura 10.3*a*). A partir de ahí, se deben colocar los sucesos y actividades que siguen a los anteriores, definiéndose, si es preciso, actividades ficticias para facilitar la construcción del grafo. Así, después de la tarea *B*, van la *D*, *E* y *F*; sin embargo, si se colocasen estas tres actividades después del suceso «fin de *B*», no se podría cumplir la condición indicada en la columna de *A*, la cual implica que, después de esta tarea, vaya tan sólo la *D*. Si se hiciesen

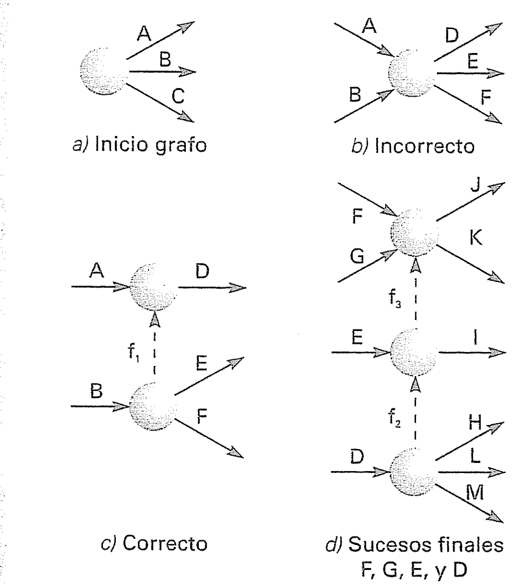


Figura 10.3. Diversas representaciones nudos/actividades.

coincidir los sucesos fin de *A* y de *B* (Figura 10.3*b*) se estaría obligando a que las actividades *E* y *F* tuviesen que esperar a que finalice la *A* para poder comenzar, lo cual no es necesario, pues son independientes de ella (ver Tabla 10.1). Así pues, esta representación no sería válida; la solución correcta aparece en la Figura 10.3*c* (similar al caso 1 de la Figura 10.2). Un problema parecido es el que se plantea con las actividades siguientes a *F*, *G*, *E* y *D*, cuya solución aparece en la Figura 10.3*d*.

En el grafo aparecerán otras dos actividades ficticias, debido a que hay dos pares de tareas (*H*, *L* y *J*, *K*) que tienen los mismos sucesos iniciales y finales. Como esto no lo permite la cuarta condición de construcción del grafo, la solución sería del tipo representado en el caso 5 de la Figura 10.2. Las actividades *M* y *N* no tienen siguientes, luego serán las que finalicen el proyecto en cuestión, llegando ambas al suceso final. Procediendo de la forma indicada, el grafo quedaría como aparece en la Figura 10.4, en la que se ha representado a cada suceso con una letra con objeto de aplicarle a continuación el método de la matriz asociada al grafo para numerar los nudos.

La matriz mencionada tendrá una fila y una columna por cada suceso que haya en el grafo. Si de un suceso *i* sale una actividad hacia el suceso *j*, el elemento a_{ij} será 1, siendo cero en caso contrario; aplicando esto a nuestro ejemplo se llega a la Tabla 10.2. En ella se puede observar que la columna *a* no tiene ningún 1, pues ese suceso

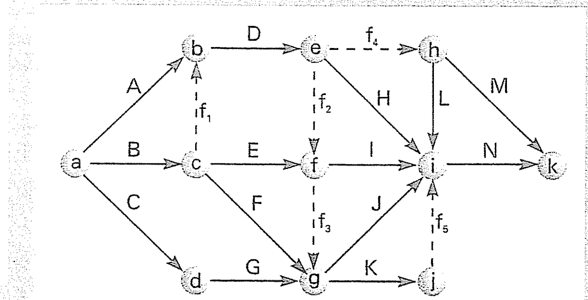


Figura 10.4. Representación del grafo PERT.

no es fin de ninguna actividad; éste será, pues, el suceso inicial y se le asignará el número 1. A continuación se eliminará la columna y la fila correspondiente al suceso marcado, quedando, en nuestro caso, una matriz de 10 × 10 a la que se le aplicará el mismo criterio. Ahora son las columnas *c* y *d* las que no contienen ningún 1, luego, indistintamente, se le podrán asignar los números 2 y 3. Se sigue el proceso eliminando las columnas y filas correspondientes a *c* y *d*, quedando una matriz de 8 × 8 a la que se le volvería a aplicar el mismo criterio, y así, sucesivamente, hasta que se hayan numerado todos los sucesos; el resultado se puede apreciar en la Tabla 10.3 y en la Figura 10.5.

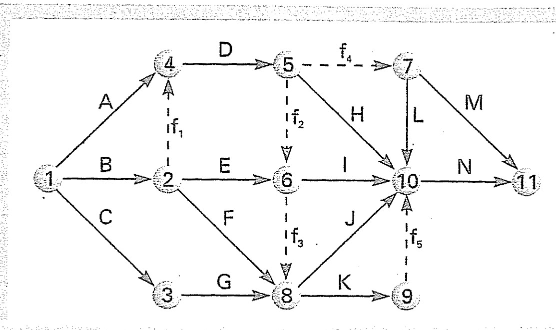


Figura 10.5. Representación del grafo PERT numerado.

Tabla 10.2. Matriz asociada al grafo

ORIGEN \ DESTINO	*a*	*b*	*c*	*d*	*e*	*f*	*g*	*h*	*i*	*j*	*k*
a	0	1	1	1	0	0	0	0	0	0	0
b	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0
c	0	1	0	0	0	1	1	0	0	0	0
d	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0
e	0	0	0	0	0	1	0	1	1	0	0
f	0	0	0	0	0	0	1	0	1	0	0
g	0	0	0	0	0	0	0	0	1	1	0
h	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	1
i	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1
j	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0
k	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0

Tabla 10.3. Matriz asociada operada

ORIGEN \ DESTINO	*a*	*b*	*c*	*d*	*e*	*f*	*g*	*h*	*i*	*j*	*k*
a	0	1	1	1	0	0	0	0	0	0	0
b	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0
c	0	1	0	0	0	1	1	0	0	0	0
d	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0
e	0	0	0	0	0	1	0	1	1	0	0
f	0	0	0	0	0	0	1	0	1	0	0
g	0	0	0	0	0	0	0	0	1	1	0
h	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	1
i	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1
j	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0
k	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	1	4	2	3	5	6	8	7	10	9	11

10.4. PROGRAMACION DE PROYECTOS MEDIANTE EL METODO PERT

Una vez elaborado el grafo queda clara la secuencia de actividades y se puede pasar a la programación de las mismas. Para ello, es necesario conocer las duraciones de las distintas actividades. Generalmente, éstas no se pueden fijar con exactitud, ya que son muchos los factores de carácter aleatorio que están relacionados con ellas. Sirva de ejemplo la actividad «escribir un informe»: ¿nos podría decir qué tiempo tardaría usted? Suponemos que la respuesta sería algo parecido a «*depende*». El PERT aborda este problema evaluando la duración de una actividad a partir de tres estimaciones:

- **Duración optimista** (*a*), que representa el tiempo mínimo en que podría ejecutarse la actividad si todo marchara excepcionalmente bien, no produciéndose ningún contratiempo durante la fase de ejecución. Se considera que la probabilidad de poder finalizar la actividad en esta duración no es superior al 1 por 100.
- **Duración más probable** (*m*), o **estimación modal**, que es el tiempo que, normalmente, se empleará en ejecutar la actividad; en el caso de que dicha tarea se hubiera realizado varias veces, sería la duración con mayor frecuencia de aparición.
- **Duración pesimista** (*b*), que representa el tiempo máximo en que se podría ejecutar la actividad si todas las circunstancias que influyen en su duración fueran totalmente desfavorables su probabilidad se considera, como máximo, del 1 por 100.

Una vez establecidas las tres estimaciones, se calcula la **duración de la actividad**, d_{ij}, mediante la expresión $d_{ij} = (a + 4m + b)/6$. Esta formulación se corresponde con la de la media de una distribución β, la cual se utiliza más que la normal por considerarla más flexible, permitiendo la consideración de que, a veces, $a = m$ o $b = m$. Aunque ha habido autores que han puesto en duda la representatividad de la distribución β en este contexto (Sasieni, 1986), otros autores han defendido posteriormente el uso de la misma[1]. Es necesario advertir que la mayor parte de las veces los responsables de las estimaciones mencionadas no se sienten seguros con las de los valores extremos, lo cual es lógico si tenemos en cuenta que muchas actividades no se realizan con frecuencia y la experiencia en las mismas es limitada o, a veces, inexistente. Afortunadamente, la precisión no es esencial, pues, a menos que la distribución sea muy simétrica, el valor medio no es muy sensible a los errores de las estimaciones realizadas alrededor de los límites del 5 ÷ 10 por 100, por lo cual no afectarán seriamente a los cálculos de la duración del proyecto (Meredith y Mantel, 1989, pág. 275).

A partir de la duración media estimada (o del valor determinístico supuesto en CPM) se puede comenzar a determinar en qué fecha ocurrirá cada uno de los sucesos del grafo. Para ello se empezará por el suceso inicial, el cual será el instante cero[2] ($t_1 = 0$); a continuación se calcularía el suceso 2, que sería la fecha del suceso 1 más la duración de la actividad 1-2 ($t_2 = t_1 + d_{12}$); después el suceso 3, etc. Si suponemos que a este último llegan dos actividades, una del suceso 1 (A_{13}) y otra del 2 (A_{23}), la ocurrencia de este suceso significaría que han finalizado ambas, por lo que su fecha sería el máximo entre $t_1 + d_{13}$ y $t_2 + d_{23}$. Generalizando, se podrá decir que $t_j = \text{máx}\ (t_i + d_{ij})$, siendo «*j*» el suceso cuya fecha hay que calcular e «*i*» cada una de las etapas origen de actividades que llegan a él. Estas **fechas** son las **más tempranas** en las que se puede dar un suceso (también conocidas como **fechas *early***); así pues, la **fecha más temprana del suceso final** nos indicará la **duración del proyecto**, D_p,[3] o tiempo mínimo en el que se puede acabar el proyecto (en condiciones normales y sin acelerar la ejecución de las distintas actividades).

Lógicamente, no todos los sucesos serán igualmente vitales, en relación al cumplimiento de fechas, para que el proyecto se finalice en el tiempo calculado

---

[1] Ver, por ejemplo, Littlefield y Randolph (1987) y Gallagher (1987).

[2] El cero se utiliza por simplificar. Se puede emplear también una fecha del calendario (por ejemplo, el 21 de junio) y, a partir de ésta, comenzar el cálculo de las fechas para los siguientes sucesos.

[3] Siempre y cuando la fecha más temprana del suceso inicial sea cero. En caso de que se hubiera optado por utilizar una fecha del calendario, la información que nos daría sería la fecha más temprana en la que se puede finalizar el proyecto.

anteriormente. Por ello, es muy interesante y útil calcular en qué momento se pueden producir, como muy tarde, cada uno de los sucesos para que el proyecto se pueda acabar en el plazo previsto[4] o acordado. Estas fechas se denominan **fechas más tardías**, T_i, del suceso (también conocidas como **tiempos *last***). Su proceso de cálculo es análogo al de las fechas más tempranas, pero empezando por el suceso final. Así pues, haremos coincidir T_n, fecha más tardía del último suceso, n, con la duración del proyecto[5]; a continuación se calculará la del suceso inmediatamente anterior ($n - 1$), que será igual a $T_{(n-1)} = T_n - d_{(n-1)n}$. Seguidamente, $T_{(n-2)}$; en el caso más general, del suceso ($n - 2$) pueden salir dos actividades, una hacia el ($n - 1$) y otra hacia el n, por lo que habrá que tener en cuenta ambas opciones. Dado que lo que se está calculando es la fecha en la que pueden comenzar, como muy tarde, ambas actividades para que no retrasen el proyecto, habrá que elegir la más temprana de ambas, es decir, la mínima, por lo que la fórmula genérica de la obtención del tiempo *last* de un suceso se podrá expresar como $T_i = \min(T_j - d_{ij})$. El proceso seguiría de forma similar hasta llegar a T_1. Este método puede resultar engorroso cuando el grafo tiene un tamaño considerable, por lo que resulta conveniente hacerlo de una manera más sistemática, como por ejemplo, utilizando el método conocido como la matriz de Zaderenko (1968, páginas 35-37), que se usará en el Ejemplo 10.2.

Las dos fechas calculadas, así como el número de orden del suceso es una información que se suele anotar de la forma que aparece en la Figura 10.6. Aquellos sucesos cuya fecha más temprana coincida con la más tardía se denominan **sucesos críticos**, ya que, al no tener ningún margen de tiempo entre ambas, cualquier retraso en su ocurrencia provocaría el del proyecto completo; serán éstos, por tanto, los que tengan que ser vigilados con más interés.

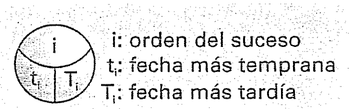


Figura 10.6. Leyenda de un suceso.

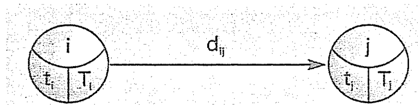


Figura 10.7. Representación gráfica de una actividad.

Si T_j representa la fecha en que, como muy tarde, se puede acabar la actividad ij y t_i aquella en la que se puede comenzar como muy pronto, $T_j - t_i$ será el intervalo de tiempo disponible para realizar dicha actividad; éste tendrá que ser mayor o igual que la duración de la misma. Si son iguales, cualquier retraso que sufra la actividad se transmitiría al suceso fin de ésta y, por tanto, a todos los sucesos posteriores, ya que sus fechas se calcularon a partir de la misma. Ello repercutirá de igual forma en la duración del proyecto, atrasando su finalización en el mismo número de días. Esta es la causa de que se denominen **actividades críticas** a aquellas cuya *duración coincide con su intervalo de ejecución*. En el caso de que el intervalo sea superior a la duración de la actividad, se dispondrá de más tiempo para su realización a la diferencia entre ambos se la denomina **holgura total** de la actividad (H_T), que se calcula, por tanto, como $H_{Tij} = T_j - t_i - d_{ij}$. Este parámetro representa el tiempo en el que se puede retrasar el comienzo de dicha actividad sin que se retrase el suceso fin de la misma, y, por tanto, tampoco el proyecto. Utilizando este nuevo concepto, se podría definir la actividad crítica como aquella que tiene holgura cero. Esta definición será válida siempre y cuando las fechas más temprana y más tardía del suceso final sean iguales; si existe una diferencia entre ambas, es decir, hay un margen para la finalización del proyecto, las actividades «críticas» serán aquellas que tengan una holgura igual a dicho margen, la cual será la menor de las existentes en el grafo.

Debido a la forma de calcular las fechas mencionadas hasta el momento y la holgura total, esta última pertenece en realidad al camino al que corresponda la actividad en cuestión y no a ella en sí misma. Si una actividad pertenece a más de un camino, su holgura será, como es lógico, la menor de los caminos correspondientes. Por ello, toda actividad crítica pertenece a un camino de holgura mínima que se denomina **camino crítico** y *es el de más larga duración existente en el grafo;* éste no tiene por qué ser único, pudiendo haber varios en el mismo grafo (ver Ejemplo 10.2).

---

[4] Este puede no coincidir con el acordado por contrato, que puede ser inferior o superior al previsto.

[5] También se puede poner como T_n la fecha tope para acabar el proyecto, pero esto se suele hacer cuando se ha utilizado una fecha de calendario como la más temprana del suceso inicial.

EJEMPLO 10.2. Programación de un proyecto en un grafo PERT[6]

A partir del grafo de la Figura 10.5, y con la duración de las actividades que aparecen sobre cada uno de los arcos de la Figura 10.8, se han calculado las fechas más tempranas y tardías, de acuerdo con lo expuesto anteriormente, dando lugar al resultado que aparece en esta última figura. Si el suceso inicial lo situamos en el instante cero, las fechas más tempranas de los distintos sucesos serían[7]:

$t_2 = t_1 + d_{12} = 0 + 9 = 9$

$t_3 = t_1 + d_{13} = 0 + 8 = 8$

$t_4 = \text{máx}\,[(t_1 + d_{14}), (t_2 + d_{24})] = \text{máx}\,[(0 + 9), (9 + 0)] = 9$

$t_5 = t_4 + d_{45} = 9 + 8 = 17$

$t_6 = \text{máx}\,[(t_2 + d_{26}), (t_5 + d_{56})] = \text{máx}\,[(9 + 5), (17 + 0)] = 17$

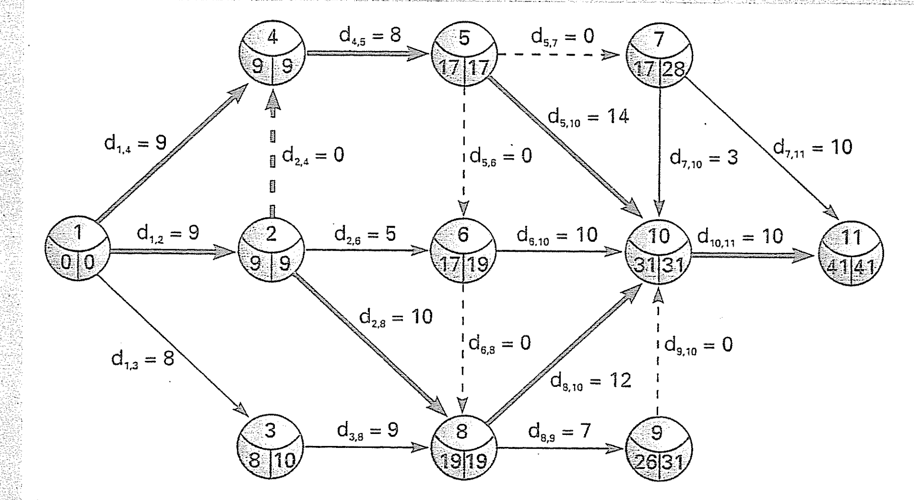


Figura 10.8. Caminos críticos.

---

[6] Más ejemplos de programación pueden verse en J. A. D. Machuca y otros (1990, Capítulo 10).

[7] Se aconseja seguir el proceso consultando la Figura 10.8.

De este modo se seguiría hasta el suceso 11, final del proyecto, que tendrá lugar cuando finalicen $A_{7,11}$ y $A_{10,11}$, últimas actividades a realizar; por ello, su fecha más temprana de ocurrencia será el máximo de las dos fechas de terminación obtenidas a partir de los tiempos *early* de dichas actividades, es decir: máx [(17 + 10), (31 + 10)] = 41. Dado que el tiempo inicial fue supuesto 0, la duración del proyecto, $D_p (= t_{11} - t_1)$, coincide con la fecha calculada, 41.

Una vez calculada D_p, se procede al cálculo de las fechas más tardías en las que pueden ocurrir cada uno de los sucesos sin que el proyecto se retrase. Para ello, se hace coincidir la fecha más temprana de finalización del último nudo con la más tardía, por lo que, en nuestro caso, $T_{11} = 41$. A continuación, se calculará la fecha más tardía en que puede darse el suceso 10 y, con ello, comenzar la actividad 10-11; dado que ésta debe finalizar, como muy tarde, el día 41, y que su duración es de 10 días, tendrá que comenzar, a lo sumo, el día 31. Numéricamente, $T_{10} = T_{11} - d_{10,11} = 41 - 10 = 31$. Del mismo modo se procede con los restantes sucesos:

$$T_9 = T_{10} - d_{9,10} = 31 - 0 = 31$$

$$T_8 = \text{mín}\,[(T_{10} - d_{8,10}), (T_9 - d_{8,9})] = \text{mín}\,[(31 - 12), (31 - 7)] = 19$$

$$T_7 = \text{mín}\,[(T_{11} - d_{7,11}), (T_{10} - d_{7,10})] = \text{mín}\,[(41 - 10), (31 - 3)] = 28$$

El proceso continúa hasta llegar al suceso inicial.

Estas fechas se podrían haber obtenido a través de la matriz de Zaderenko, lo cual veremos a continuación. Para ello, se construye una matriz cuadrada de orden igual al número de sucesos que tiene el grafo (Tabla 10.4);

Tabla 10.4. Matriz de Zaderenko

t_i	$i \backslash j$	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
0	1		9	8	9	°	°	°	°	°	°	°
9	2			°	0	°	5	°	10	°	°	°
8	3				°	°	°	°	9	°	°	°
9	4					8	°	°	°	°	°	°
17	5						0	0	°	°	14	°
14	6							°	0	°	10	°
17	7								°	°	3	10
19	8									7	12	°
26	9										0	°
31	10											10
41	11											
	T_j	0	9	10	9	17	19	28	19	31	31	41

el elemento genérico a_{ij}, representa la duración de la actividad que va desde el suceso i hasta el j; cuando ésta no exista colocaremos un °. Para comenzar a operar, se añade a la izquierda una nueva columna, que será donde se vayan marcando las fechas más tempranas de cada suceso, siendo 0 la del suceso 1. A partir de ahí, para obtener un determinado t_i, se harán las sumas parciales de cada valor numérico de la columna que corresponde al suceso en cuestión con los correspondientes valores de t_i de las respectivas filas, escogiéndose como t_i el máximo valor de las mismas.

Como caso aclaratorio, y suponiendo que ya se han calculado las fechas t_i de los siete primeros sucesos, calcularemos t_8. En la columna 8 aparecen tres valores numéricos (10, 9 y 0), a los que corresponden, en sus respectivas filas, los siguientes valores de t_i: 9, 8 y 14 (remarcados en la tabla). De acuerdo con el significado de los elementos mencionados, t_9 será el máximo entre (10 + 9), (9 + 8) y (0 + 14), es decir, 19. De acuerdo con esta mecánica, que corresponde conceptualmente con lo expuesto anteriormente, el cálculo de los t_i se realiza, en orden estricto, desde el suceso 1 hasta el último.

Para el cálculo de las fechas más tardías se añade una fila (T_j) y se comienza en el suceso final (con $T_{11} = t_{11} = 41$), calculando en orden estricto hasta llegar a T_1. El procedimiento es similar al de los t_i, tomándose ahora la fila del suceso cuya T_j se desea calcular (por ejemplo: el 8), donde aparecen una serie de valores (7 y 12 para el suceso 8). A continuación, se toman los T_j correspondientes a las columnas de dichos valores (31 y 31 en nuestro caso) y se hacen las diferencias $T_j - d_{ij}$ [(31 − 7) y (31 − 12)], escogiéndose el mínimo de las mismas ($T_8 = 19$).

Los resultados obtenidos operando de la forma indicada aparecen en la Tabla 10.4.

Una vez conocidas las fechas de los sucesos se está en disposición de calcular las holguras de las actividades, para así poder determinar el(los) camino(s) crítico(s).

$$H_{1,2} = T_2 - t_1 - d_{1,2} = 9 - 0 - 9 = 0$$
$$H_{1,3} = T_3 - t_1 - d_{1,3} = 10 - 0 - 8 = 2$$
$$H_{1,4} = T_4 - t_1 - d_{1,4} = 9 - 0 - 9 = 0$$
$$H_{2,4} = T_4 - t_2 - d_{2,4} = 9 - 9 - 0 = 0$$
$$H_{2,6} = T_6 - t_2 - d_{2,6} = 19 - 9 - 5 = 5$$
$$H_{2,8} = T_8 - t_2 - d_{2,8} = 9 - 9 - 10 = 0$$
$$H_{3,8} = T_8 - t_3 - d_{3,8} = 19 - 8 - 9 = 2$$
$$H_{4,5} = T_5 - t_4 - d_{4,5} = 17 - 9 - 8 = 0$$
$$H_{5,6} = T_6 - t_5 - d_{5,6} = 19 - 17 - 0 = 2$$
$$H_{5,7} = T_7 - t_5 - d_{5,7} = 28 - 17 - 0 = 11$$
$$H_{5,10} = T_{10} - t_5 - d_{5,10} = 31 - 17 - 14 = 0$$
$$H_{6,8} = T_8 - t_6 - d_{6,8} = 19 - 17 - 0 = 2$$
$$H_{6,10} = T_{10} - t_6 - d_{6,10} = 31 - 14 - 10 = 7$$

$$H_{7,10} = T_{10} - t_7 - d_{7,10} = 31 - 17 - 3 = 11$$
$$H_{7,11} = T_{11} - t_7 - d_{7,11} = 41 - 17 - 10 = 14$$
$$H_{8,9} = T_9 - t_8 - d_{8,9} = 31 - 26 - 19 - 7 = 5$$
$$H_{8,10} = T_{10} - t_8 - d_{8,10} = 31 - 19 - 12 = 0$$
$$H_{9,10} = T_{10} - t_9 - d_{9,10} = 31 - 26 - 0 = 5$$
$$H_{10,11} = T_{11} - t_{10} - d_{10,11} = 41 - 31 - 10 = 0$$

Las actividades sin holgura (las críticas) se han representando con un trazo más grueso en la Figura 10.8, donde se observa que existen tres caminos críticos: el 1-2-4-5-10-11, el 1-2-8-10-11 y el 1-4-5-10-11.

Como se ha podido ver en el ejemplo anterior el(los) camino(s) crítico(s) son los que van a marcar la duración del proyecto, por lo que habrá que prestarle(s) una especial atención para lograr que la ejecución se realice en el plazo previsto. Ello no tiene por qué implicar un trabajo exhaustivo, pues, en los proyectos reales, las actividades críticas no suelen sobrepasar el 10 por 100 del total (Meredith y Mantel, 1989, pág. 269), aunque en los ejemplos de este capítulo, con objeto de simplificar, dicho porcentaje sea superior. Ello no significa que se descuiden las actividades no críticas, ya que si alguna de éstas se retrasa en un período de tiempo igual a su holgura, se convertirá en crítica, consumiendo la holgura del camino correspondiente, que se transformará a su vez en crítico. Por ello, es aconsejable la realización de controles periódicos, que permitan ver el grado de realización de las tareas en curso. A esto dedicamos el Apartado 10.6.

10.5. LA CONSIDERACION DE FACTORES ALEATORIOS EN LA DURACION DEL PROYECTO

Del carácter aleatorio de las duraciones de las tareas se deriva que las fechas obtenidas para los diferentes sucesos y, en particular para la finalización del proyecto, encierran un cierto riesgo que es conveniente medir. Para ello es necesario conocer la varianza de la distribución aleatoria a la que responde la duración del proyecto, la cual se obtiene a partir de las actividades que componen el(los) camino(s) crítico(s); por ello, si asumimos las hipótesis de independencia en las duraciones de las tareas y de que el número de actividades que componen el camino crítico es lo suficientemente elevado[8], se puede aplicar el teorema central del límite. De acuerdo con ello, la duración del proyecto se distribuirá según una normal, cuya media será la suma de las medias de las diferentes actividades que componen el camino crítico y su varianza la suma de las varianzas de las mismas.

En el caso de que existieran varios caminos críticos, el valor de la media obtenida será el mismo, pero no así el de las varianzas de cada uno de ellos, por lo que se suele optar por utilizar la que tenga un mayor valor, ya que sería la que encerrase un mayor riesgo. Así pues, una vez conocidas las medias y las varianzas de las actividades que componen el proyecto, se podrá conocer la probabilidad de realizar el mismo en una fecha o plazo determinado o bien la duración que implica una cierta probabilidad de cumplimiento (ver Ejemplo 10.3).

[8] La mayoría de los autores aceptan que esto se cumple a partir de 10 o 15 tareas (J. A. D. Machuca y otros, 1990, pág. 371).

EJEMPLO 10.3. Efectos de factores aleatorios en la programación

En el grafo de la Figura 10.9 aparecen las duraciones de las actividades que componen el proyecto representado, así como la varianza de dicha duración, separadas por una barra ($\bar{d}_{ij}/\sigma^2$).

Una vez realizado el cálculo de las fechas más tempranas y tardías de los sucesos, se puede apreciar la existencia de dos caminos críticos, el 1-3-4-5-6 y el 1-5-6, ambos con una duración media de 80 días. Sin embargo, las varianzas de los mismos son diferentes, 16 en el primer caso ($\sigma^2_{13} + \sigma^2_{34} + \sigma^2_{45} + \sigma^2_{56} = 4 + 4 + 4 + 4$) y 20 en el segundo ($\sigma^2_{15} + \sigma^2_{56} = 16 + 4$). Como se indicaba anteriormente, se tomará como varianza de la duración del proyecto la mayor, ya que es aquella cuya consideración cubriría más riesgo. Así, estaremos en disposición de responder a una serie de cuestiones acerca de la finalización del proyecto en una determinada fecha, por ejemplo:

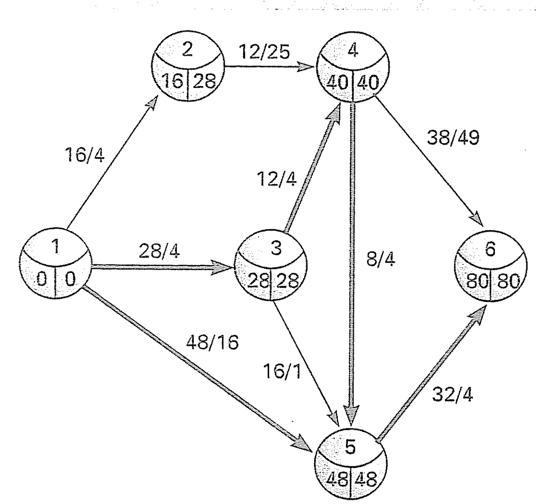


Figura 10.9. Grafo PERT con duraciones aleatorias.

- **¿Qué probabilidad existe de acabar el proyecto el día 85 o antes?**[9]

Aquí lo que se está planteando es calcular la probabilidad de que la duración del proyecto, Dp, sea menor o igual que 85, es decir, $P(Dp \leqslant 85)$, que tipificando se puede expresar como $P(z \leqslant (Dp - \overline{Dp})/\sigma Dp) = P(z \leqslant (85 - 80)/\sqrt{20}) = P(z \leqslant 5/\sqrt{20}) = P(z \leqslant 1{,}12)$. Ello da en la tabla de la normal una probabilidad del 86,86 por 100.

- **¿Qué probabilidad existe de acabar el proyecto después del día 75?**

En este caso, la probabilidad buscada es $P(Dp > 75)$, como las tablas que estamos utilizando son de las llamadas de «cola a la izquierda» $[P(z \leqslant x)]$, la transformaremos de la siguiente forma: $P(Dp > 75) = 1 - P(Dp \leqslant 75) = 1 - P(z \leqslant (75 - 80)/\sqrt{20}) = 1 - P(z \leqslant -5/\sqrt{20}) = 1 - P(z \leqslant -1{,}12) = 1 - 0{,}1314 = = 86{,}86$ por 100.

- **¿Qué probabilidad existe de acabar el proyecto después del día 90, pero como máximo el 95?**

La probabilidad solicitada se puede expresar como $P(90 < Dp \leqslant 95)$, que se puede calcular como $P(Dp \leqslant 95) - P(Dp \leqslant 90)$. Desarrollando como en los casos anteriores, se tendría: $P(z \leqslant (95 - 80)/\sqrt{20}) - P(z \leqslant (90 - 80)/\sqrt{20}) = P(z \leqslant 15/\sqrt{20}) - P(z \leqslant 10/\sqrt{20}) = P(z \leqslant 3{,}35) - P(z \leqslant 2{,}24) = 0{,}9996 - 0{,}9875 = 1{,}21$ por 100.

- **¿Cuál es la duración del proyecto que tiene una probabilidad del 80 por 100 de no ser sobrepasada?**

En este caso, el proceso a seguir es inverso al realizado en los apartados anteriores, es decir, la probabilidad nos dará el valor de z y éste, a través de la expresión que lo liga con Dp, nos proporcionará el valor de esta última que cumple el objetivo deseado. Así, buscando en la tabla de la normal tipificada el valor de z correspondiente a la probabilidad de 0,8, obtenemos $z \approx 0{,}84$, desarrollando $z = 0{,}84 = (Dp - \overline{Dp})/\sigma Dp = (Dp - 80)/\sqrt{20}$, de donde $Dp = 0{,}84 \times \sqrt{20} + 80 \approx 84$ días.

De todas formas, tenemos que ser conscientes de todas las simplificaciones que hemos realizado a la hora de desarrollar este apartado, ya que se ha obviado una serie de características estadísticas bastante importante. Sirva de muestra que en el Ejemplo 10.3 hemos estado trabajando con una $\overline{Dp}$ de 80 y una varianza de 20, pero existe una actividad, la 4-6, que, teniendo una holgura de dos días y una varianza de 49, se puede volver crítica en cualquier momento, cosa que no se

[9] Para responder a esta pregunta, como a todas las que haremos a continuación, utilizaremos la tabla de la normal tipificada que aparece en el Apéndice al final del libro.

ha tenido en cuenta. Es decir, puede ocurrir que un camino no crítico tenga una varianza superior a la del camino crítico, lo cual implica un mayor riesgo en el cumplimiento de su duración. Si ésta tiene un valor cercano al crítico, sería conveniente dedicarle especial atención, pues es una posible fuente de incumplimiento de fechas. En resumidas cuentas, queremos hacer notar que a la hora de resolver un problema real de este tipo resulta insuficiente la resolución expuesta; tan sólo hemos intentado indicar el camino a seguir, pero los pasos estadísticos necesarios nos llevarían excesivas páginas, por lo que aconsejamos al lector un estudio a fondo del teorema central del límite, así como de sus aplicaciones.

Otro factor a considerar es que, a pesar de que el uso de la duración media del proyecto y de la hipótesis de distribución normal hace que ello implique una probabilidad de 0,5 en su cumplimiento, esto puede no resultar cierto. En el caso de que existiesen varios caminos que pudieran considerarse independientes, la probabilidad de que todos ellos se terminen a tiempo sería el producto de sus probabilidades respectivas, lo cual arrojaría siempre un valor inferior al mencionado 0,5.

Todos estos factores de riesgo hacen aconsejable que el director del proyecto considere la utilización de una cierta holgura para la realización del mismo, la cual será función de cada caso concreto. Ello es especialmente importante si tenemos en cuenta que, además, dada la complejidad y la larga duración de los proyectos, no es extraño que puedan surgir cambios en el mismo no contemplados en un principio y que, frecuentemente, ello no implique una aceptación por parte del cliente de un alargamiento del tiempo de realización.

10.6. CONTROL DE PROYECTOS CON GRAFOS PERT

Una vez conocido el plazo de ejecución del proyecto, así como las fechas de cada una de las actividades que lo componen, habrá que realizar un seguimiento del mismo. Para ello, la información obtenida en los controles periódicos debe trasladarse al grafo. Partiendo de un grafo sin fechas, los pasos a seguir para ver la marcha prevista después del momento de control son los siguientes:

- Se pone como fecha inicial del proyecto la fecha del control.
- Las actividades que hayan finalizado se considerarán con duración nula.
- Las actividades en curso se programarán con una duración igual al tiempo estimado para su terminación.
- Las actividades que no hayan comenzado seguirán con la duración inicial.

Si el control se realiza manualmente, es más cómodo anular las actividades que ya han finalizado, haciendo salir del suceso inicial todas las actividades en curso (con duración igual al tiempo que les queda para finalizar) y aquellas otras que puedan comenzar en el instante del control, respetando el resto del grafo. A partir de dicho grafo, se reprograma de acuerdo con lo expuesto en el párrafo anterior, observándose si la duración del proyecto ha sufrido o no modificación. En el primer caso, se intentaría tomar las medidas oportunas para hacer que finalice en la fecha deseada. Así, si el proyecto se ha retrasado, habrá que acortar actividades que pertenezcan al camino crítico, con objeto de conseguir un adelantamiento en la fecha de finalización; al hacerlo habrá que tener en cuenta que no aparezcan nuevos caminos críticos o, en caso de que así sea, acortarlos a todos conjuntamente, de forma que el proyecto pueda finalizarse en la fecha deseada. Todo lo expuesto anteriormente se ilustra en el Ejemplo 10.4.

Ejemplo 10.4. Control de un proyecto en un grafo PERT

En el proyecto representado en la Figura 10.8 se realiza un control el período 15, observándose que:

- A la actividad 2-6 le queda un día para su finalización.
- La tarea 2-8 lleva cinco períodos de ejecución al ritmo previsto.
- La actividad 3-8 ha finalizado.
- De la actividad 4-5 se lleva realizado el 50 por 100 de la misma.

Al estar realizándose, o haberse finalizado, actividades que salen de los nudos 2, 3 y 4, implica que todas las tareas que llegan a esos nudos han tenido que acabar, luego la duración de las mismas será cero. De acuerdo con la información obtenida, las nuevas duraciones para las 2-6, 2-8, 3-8 y 4-5 serán, respectivamente, 1, 5 (10 − 5 = 5), 0 y 4 (8/2 = 4); el resto de las actividades permanecerá con las duraciones estipuladas. Esto nos lleva a transformar el grafo de la Figura 10.8, colocando como fecha inicio la del control (15) y obteniendo el que aparece en la Figura 10.10.

La zona que aparece sombreada representa todo lo que está hecho y es la que, para simplificar el grafo, se puede sustituir por un nuevo nudo, al que se le denominará «*i*» para respetar la numeración del resto de los sucesos. Se obtiene así la Figura 10.11.

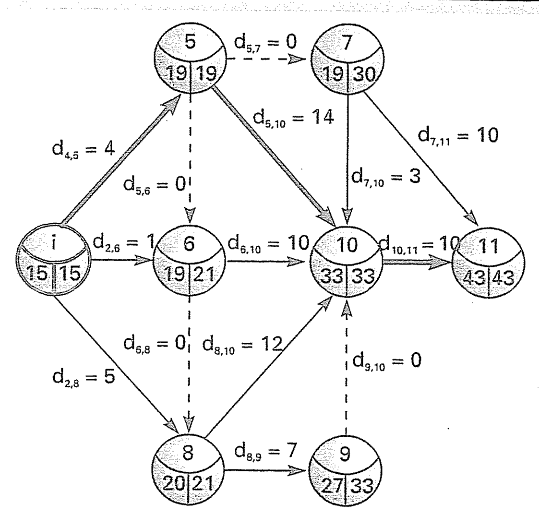


Figura 10.11. Grafo después del control (resumido).

Se puede apreciar cómo el proyecto ha sufrido un retraso de dos períodos, ya que la nueva fecha de finalización prevista es el 43 en vez del 41 como estaba programado inicialmente; de hecho, los caminos críticos han variado, habiendo desaparecido algunos de los antiguos y quedando actualmente el *i*-5-10-11, que será el que se tendrá que acortar si se desea finalizar en la fecha prevista. Para ello bastará, en este caso, acortar alguna o algunas de las actividades que componen dicho camino crítico (invitamos al lector a que realice dicho acortamiento). En el caso de que se decida acortar la 10-11 en esos dos períodos de diferencia, el proyecto se finalizará el día 41. Si, por el contrario, se decide acortar en dos períodos la *i*-5 o la 5-10, se observará que el proyecto tan sólo lo hace en un día; esto es debido a que la rama *i*-8-10 tiene tan sólo un período de holgura, por lo que disminuir en dicha cantidad la fecha del suceso 10, el 8 se convierte en crítico y con él el camino *i*-8-10, que también habría que acortar. La solución podría ser, en este último caso, acortar en dos días las ramas *i*-5-10 y en uno la *i*-8-10, con lo que se conseguirá el efecto buscado de finalizar el proyecto el día 41.

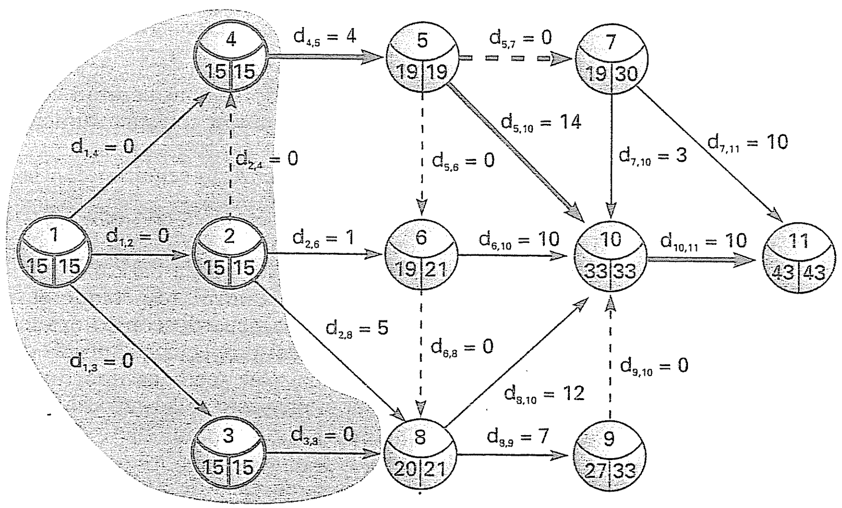


Figura 10.10. Grafo después del control.

El ejemplo anterior muestra que existen distintas posibilidades a la hora de decidir qué actividad (o actividades) habría que acortar para obtener la duración deseada de un proyecto. Es evidente que, generalmente, deben emplearse criterios concretos para tomar tal decisión; una vía lógica desde el punto de vista económico es elegir aquella alternativa que resulte menos costosa. Antes de seguir avanzando en esta línea vamos a pasar a comentar la relación existente entre la duración de una actividad y los costes que genera, así como el coste total del proyecto.

10.7. CONSIDERACION DE LOS COSTES EN LA EJECUCION DE UN PROYECTO

La realización de cualquier proyecto trae consigo la aparición de dos tipos de costes: **directos**, que provienen de factores directamente imputables a cada tarea (materias primas, mano de obra, horas máquina, etc.), e **indirectos**, que son imputables mediante claves de distribución (gastos generales, supervisión, etc.). Los costes directos de una actividad suelen estar relacionados inversamente con su duración por una función del tipo representado en la Figura 10.12*a*. En ella se puede apreciar un mínimo en el punto *N*, que corresponde al denominado **coste normal** de la actividad, C_{Nij}; la duración que éste define, d_{Nij}, se conoce como **duración normal** de la tarea y es la que se utiliza en una primera programación. Esta se puede acortar hasta un mínimo, correspondiente a la llamada **duración récord**, d_{Rij}, la cual está ligada al denominado **coste récord de la actividad**, C_{Rij}.

Como se planteaba en el apartado anterior, es obvio que cuando es necesario acortar la duración de un proyecto, uno de los factores a considerar será el intentar hacerlo con el mínimo incremento de coste; para ello se deberá realizar una adecuada elección de la(s) tarea(s) crítica(s) que deberá(n) sufrir una disminución en su duración. Con objeto de facilitar este proceso, la curva de la Figura 10.12*a* suele asimilarse a una recta entre los puntos récord y normal, *R* y *N*, (Figura 10.12*b*), o, cuando esta aproximación acarree demasiado error, a una poligonal de un número conveniente de lados (Figura 10.12*c*).

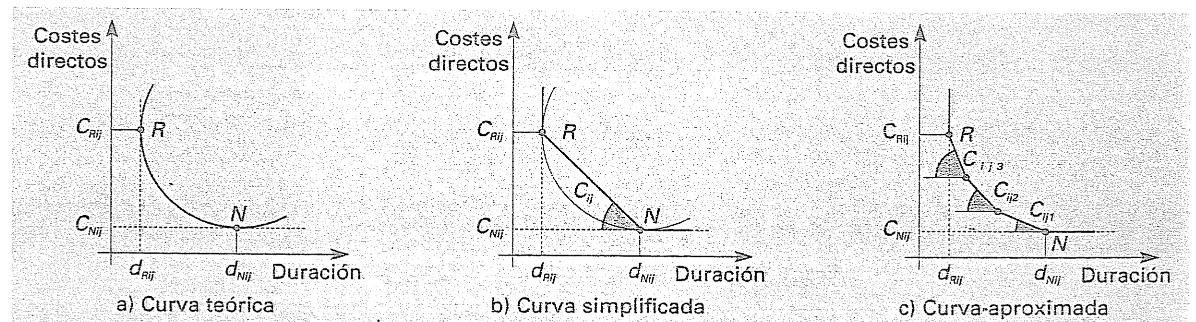


Figura 10.12. Relaciones costes/duración.

La mayoría de los procedimientos empleados para acelerar un proyecto, provocando el mínimo incremento de coste, utiliza el concepto de **pendiente de coste, c_{ij},** entendiendo por tal al incremento producido en este último al reducir la duración de la tarea en una unidad de tiempo. Es evidente que una actividad tendrá tantas pendientes de coste como lados tenga la poligonal que representa su función de costes directos-duración. En la Figura 10.12*b*, y para el tramo *RN*, tendremos: $C_{ij} = (C_{Rij} - C_{Nij}) / (d_{Nij} - d_{Rij})$.

Basándonos en el concepto anterior, es fácil comprender que el acortamiento de una actividad será tanto más económico cuanto más pequeña sea su pendiente de coste.

Partiendo de una situación en que todas las tareas estén en duración normal (punto normal del proyecto, D_{NP}) y siguiendo un procedimiento adecuado, se podrá reducir la duración de un proyecto hasta que un camino crítico tenga todas sus actividades en duración récord, instante a partir del cual sería inútil cualquier intento de acortamiento. Se puede decir entonces que dicho **camino crítico** está **bloqueado** y que el proyecto se encuentra en un **punto récord, D_{RP}.** El **coste normal del proyecto, C_{NP},** es igual a la suma de los costes normales de todas sus tareas, y el **coste récord del proyecto, C_{RP},** será igual a C_{NP} más los incrementos de coste producidos por la reducción de las duraciones de las tareas críticas que nos han llevado a D_{RP}. El resultado es la obtención de una curva de costes directos-duración para el proyecto en su conjunto (Figura 10.13*a*), la cual variará con las tareas elegidas para el acortamiento. Si a esta curva se le suma la de los costes indirectos del proyecto (Figura 10.13*b*), en la que se incluyen posibles primas y penalizaciones debidas a terminar el proyecto en fechas distintas a las especificadas, se obtendrá la curva de costes totales (Figura 10.13*c*), cuyo mínimo señala la hipotética **duración óptima del proyecto, D_{OP}.** Las curvas de las Figuras 10.13*a* y 10.13*c* pueden ser de gran utilidad a la hora de discutir con la Alta Dirección o con los clientes cuando éstos piden menores duraciones sin una clara comprensión de los costes que ello implica.

De entre los diferentes procedimientos existentes para acortar la duración de un proyecto con el mínimo coste y determinar su duración récord y/o su duración óptima, mencionaremos dos. El primero es el algoritmo simplificado de Ford Fulkerson,que asimila el grafo a una red de conducción de flujo, cuyos conductos son los arcos, y pretende mandar el máximo flujo posible desde el suceso inicial al suceso final[10]; el segundo es el algoritmo de Ackoff y Sasieni, que se ilustra en el Ejemplo 10.5.

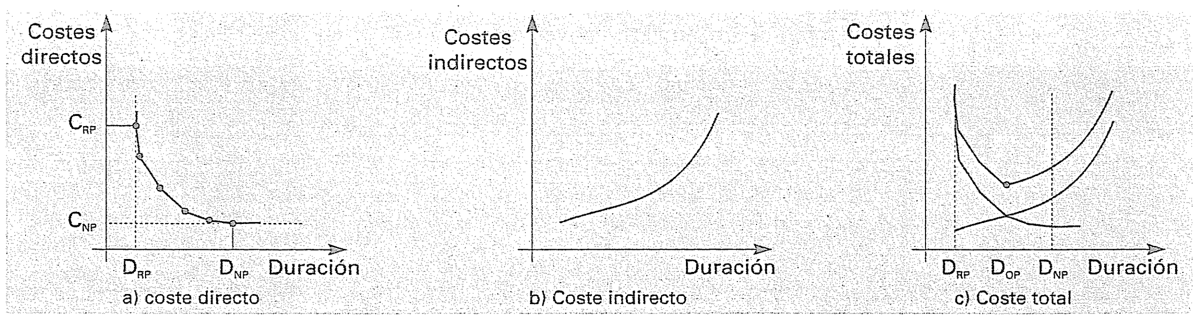


Figura 10.13. Curvas de costes de un proyecto.

[10] Aconsejamos al lector el estudio de este método, que puede ver, por ejemplo, en J. A. D. Machuca y otros (1990, págs. 385 a 419).

Ejemplo 10.5. Aplicación del algoritmo de Ackoff y Sasieni

La realización de un determinado proyecto se ajusta al grafo de la Figura 10.14, donde sobre cada actividad aparece su duración normal, duración récord y pendiente de coste de la forma d_n, d_r/c_{ij}. Cuando en alguna actividad coincidan su duración normal y récord y, por tanto, sus costes respectivos, su pendiente de coste tomará el valor de indeterminado ((0 − 0)/(0 − 0) = 0/0); éste es el caso de la 2-5. El coste indirecto que genera la ejecución del proyecto corresponde a la función $4Dp + 250$ y el coste directo, en duración normal, 400 u.m. Se desea conocer su duración óptima y la récord.

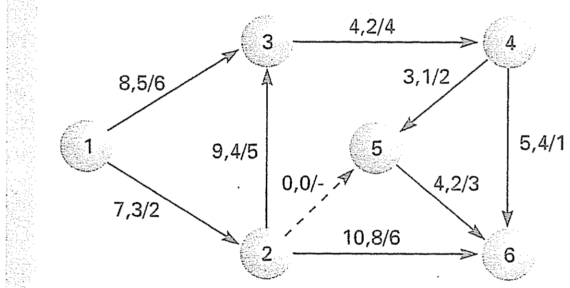


Figura 10.14. Grafo PERT-coste.

Para aplicar el algoritmo de Ackoff y Sasieni se debe comenzar reconociendo los distintos caminos existentes entre el nudo inicial y el final, en este caso seis (columna 1 de la matriz representada en la Tabla 10.5), que darán lugar a las seis filas que componen el cuerpo central de dicha matriz. Este estará formado por tantas columnas como actividades compongan el proyecto; en el caso a desarrollar son nueve (columnas 2 a 10). Los distintos elementos a_{ij} son las pendientes de coste de las actividades situadas en la columna *j* si éstas pertenecen al camino correspondiente a la fila *i*; en caso contrario, se anulará la casilla correspondiente a dicho elemento. Si existiera alguna actividad con pendiente de coste múltiple, tendría tantas columnas como pendientes de costes diferentes se le hubieran asignado.

Una vez realizado lo expuesto en el párrafo anterior, se amplía la matriz con la columna I y la fila I, donde se situarán, respectivamente, la longitud del camino correspondiente a cada fila (columna I), así como el máximo acortamiento que puede sufrir cada actividad, dada por la diferencia entre sus duraciones normal y récord (fila I); si se tratase de una columna relativa a una pendiente de coste múltiple, el intervalo que aparecería sería el correspondiente a la pendiente a que se refiera dicha columna. Seguidamente se localiza el mayor elemento de la columna I, que corresponderá al camino crítico por

		1-2	1-3	2-3	2-5	2-6	3-4	4-5	4-6	5-6	I	II	III	IV	V	VI	VII
A	1-2-3-4-5-6	2		5			4	2		3	27	23	21	19	18	14	13
B	1-2-3-4-6	2		5			4		1		25	21	21	19	18	14	13
C	1-2-5-6	2			0/0					3	11	7	7	7	6	6	6
D	1-2-6	2				6					17	13	13	13	13	13	13
E	1-3-4-5-6		6				4	2		3	19	19	17	15	14	14	13
F	1-3-4-6		6				4		1		17	17	17	15	14	14	13
	I	4	3	5	0	2	2	2	1	2							
	II	0	3	5	0	2	2	2	1	2							
	III	0	3	5	0	2	2	0	1	2							
	IV	0	3	5	0	2	0	0	1	2							
	V	0	3	5	0	2	0	0	0	1							
	VI	0	3	1	0	2	0	0	0	1							
	VII	0	2	0	0	2	0	0	0	1							

Tabla 10.5. Matriz de Ackoff-Sasieni

ser el de más larga duración; en este caso sería el *A*. Para acortarlo, se elegirá la actividad que, perteneciendo al camino elegido, tenga menor pendiente de coste. Se puede observar que resultaría indiferente escoger a la actividad 1-2 o a la 4-5, ya que en ambas aparece un valor de 2, lo cual indica el mismo coste de acortamiento; elegimos la 1-2, que permite un acortamiento de cuatro unidades, disminuyéndose en dicha cuantía los caminos *A*, *B*, *C* y *D*, ya que dicha actividad pertenece a todos ellos. El camino crítico pasaría a tener una longitud de 23, superior a los caminos que no han variado su duración (*E* y *F*), por lo que sería posible dicho acortamiento, ya que no generaría la aparición de un nuevo camino crítico. Con ello se ampliaría la matriz con la columna y fila II, donde aparecen, respectivamente, las nuevas duraciones de los caminos y el máximo acortamiento que puede sufrir cada actividad. Nótese que la fila II es igual que la I, a excepción del primer elemento, ya que, en las condiciones actuales, la actividad correspondiente, 1-2, está en duración récord, por lo que no se podrá acortar. En relación con la columna II, muestra cómo la longitud de los caminos a los que pertenecía la actividad 1-2 se han reducido en las cuatro unidades acortadas a dicha actividad.

El próximo acortamiento sería a través de la actividad 4-5, que se podría reducir en los dos períodos que ésta permite, llevando el proyecto a una duración de 21 períodos y apareciendo un nuevo camino crítico, el *B*. En el caso de que la longitud de este camino hubiera sido tan sólo de 22, se podría haber acortado la actividad 4-5 en una unidad, ya que la longitud de este camino habría marcado la nueva duración del proyecto. A partir de este momento habrá que acortar simultáneamente los caminos *A* y *B*, que es lo que se hace en el siguiente paso con la actividad 3-4, llevando el proyecto a una duración de 19. Para pasar de la columna IV a la V, y reducir simultáneamente los dos caminos críticos, se han tenido que acortar las actividades 4-6 y 5-6, siendo el máximo acortamiento el permitido por la 4-6 (un período); así pues, es posible aún acortar en una unidad la tarea 5-6. Estos dos caminos se podrían haber reducido actuando tan sólo sobre la actividad 2-3, pero ello habría sido más caro que la opción elegida, por lo que no se ha tenido en cuenta.

El proceso descrito anteriormente se seguirá repitiendo hasta que se llegue a un camino cuyas tareas estén todas en duración récord; en este caso, ello ocurre con el 1-2-3-4-6, por lo que se habrá llegado a la duración récord del proyecto, siendo imposible reducir más la duración del mismo[11].

Una vez realizados todos los acortamientos, estamos en disposición de obtener los costes totales del proyecto para así conocer la duración óptima del mismo. Para el cálculo de los incrementos de costes directos que se han generado se multiplicará la pendiente de coste de la(s) actividad(es) acortada(s) por el número de períodos en que se ha reducido su duración; así, por ejemplo, para pasar de 27 a 23 días se optó por acortar la tarea 1-2, cuya pendiente de coste es 2; luego el incremento producido será: 4 períodos × 2 u.m/período = 8 u.m.; en el caso del acortamiento de 19 a 18, éste se hizo simultáneamente en la 4-6 y 5-6, lo cual supuso un incremento de coste directo de 1 + 3 = 4. Tabulando esta información, junto con los costes indirectos, podemos obtener fácilmente los totales; el resultado de la misma aparece en la Tabla 10.6. En ella se puede observar que la duración óptima es cualquiera comprendida entre 18 y 21 días, ambos inclusive.

Puede darse el caso de que al elegir las actividades para acortar los diferentes caminos críticos haya algún camino que contenga más de una de dichas actividades, por lo que éste se reducirá más que el resto, dejando de ser crítico.

Tabla 10.6. Costes del proyecto en función de su duración

Duración	27	23	21	19	18	14	13
Incremento de coste directo	0	8	4	8	4	20	11
Coste directo	400	408	412	420	424	444	455
Coste indirecto	358	342	334	326	322	306	302
Coste total	758	750	746	746	746	750	757

10.8. CONSIDERACION DE LOS RECURSOS EN LA PLANIFICACION Y PROGRAMACION DE PROYECTOS

En los apartados anteriores hemos realizado la planificación, programación y control de proyectos sin tener en cuenta si existen o no recursos suficientes para

[11] Recomendamos la lectura de las páginas 419 a 423 de J. A. D. Machuca y otros (1990), donde aparecen varias situaciones diferentes al resolver el grafo mediante este algoritmo.

llevarlas a cabo en la realidad. Sin embargo, ése no será el caso más común, por lo que habrá que considerar este último factor en aras a conseguir resultados realistas; en general, los recursos a considerar cuando se analice la duración definitiva de un proyecto son personal, equipos, instalaciones, presupuesto financiero y, por supuesto, el tiempo, que constituye un recurso crítico en la gestión del mismo. En general, **los dos extremos posibles** en la consideración de recursos plantean como **restricción el tiempo o los recursos**. En el primer caso, el proyecto deberá ser terminado en un plazo máximo de tiempo usando la menor cantidad posible de recursos, aunque este último aspecto es el menos crítico. En el segundo, no se podrá exceder un cierto nivel para algunos recursos críticos, debiendo ejecutarse el proyecto en el menor tiempo posible con la restricción mencionada. Ello representa una compleja tarea, pues no se tratará sólo de asignar recursos de forma que se consigan los objetivos y restricciones establecidos, sino también de seleccionar el método de trabajo más eficaz para desarrollar las distintas actividades.

Una vez realizada la programación del proyecto, una secuencia usual a seguir para considerar la problemática de los recursos es la siguiente (Spinner, 1992, página 93):

- Representar las actividades (o los «paquetes de trabajo» en su caso) (ver Apartado 10.11) en un diagrama tipo Gantt, que se suele denominar PERT-Calendario (ver Ejemplo 10.6), colocándolas en sus fechas más tempranas.
- Realizar el correspondiente diagrama de cargas (ver Apartado 9.4.1) para los distintos recursos fundamentales.
- Si hay recursos disponibles se adopta la programación. En caso contrario, ajustar la programación moviendo las diferentes actividades no críticas de mayor a menor holgura.
- Si una actividad debe retrasarse tanto que se excediera su holgura, puede intentarse incrementar las disponibilidades del (de los) recurso(s) necesario(s) o programar su comienzo tan pronto como lo permitan estas últimas.
- Si ocurre esto último, debe considerarse el efecto del retraso sobre el resto de las actividades.
- Una vez fijada la nueva programación de una tarea, ésta quedará fija mientras se opere con las restantes, siguiendo el proceso hasta que se consiga el objetivo buscado.

Lógicamente, es conveniente sistematizar dicho proceso dado el gran número de actividades a considerar en un proyecto complejo. Por otra parte, existe el problema adicional de encontrar criterios claros que permitan llegar al mejor uso de los recursos.

10.8.1. Nivelación de recursos

Son muchas las industrias que en la asignación de recursos persiguen una nivelación de los mismos, dentro del tiempo máximo establecido, con objeto de conseguir mayor estabilidad. Las ventajas de un uso estable de los recursos son diversas (ver Capítulo 3) y, entre ellas, podemos citar una menor necesidad de control, la posibilidad de utilizar una gestión Justo a Tiempo (ver Capítulos 6 y 7), incrementar la moral de los trabajadores si el recurso es el factor humano, etc.

La nivelación de recursos puede utilizarse para casi todos los proyectos, independientemente de que exista o no limitación de recursos (ver Ejemplo 10.6).

Aunque para proyectos simples es posible hacer manualmente la nivelación; al aumentar la complejidad del proyecto y el número de recursos a considerar, el uso de medios informáticos se vuelve indispensable; ello permite, además, experimentar diversas posibilidades de uso de recursos, lo cual aumenta la flexibilidad del procedimiento.

Para llevar a cabo la nivelación existen varios algoritmos, la mayoría heurísticos, que persiguen que el consumo de recursos por unidad de tiempo sea lo más uniforme posible (es decir, alrededor de la media del consumo total). Estos métodos suelen penalizar de alguna forma la desviación que se genera entre dicha media y el consumo por período resultante de la programación, que puede ser tanto por exceso como por defecto. Un caso ilustrativo es el propuesto por Burgess y Killebrew (1962), que resolvieron este problema con un método heurístico cuyas bases condensa Boss (1966) en el siguiente postulado: *La eficacia de la asignación de un recurso determinado, en función de una distribución ideal, varía en sentido inverso a la suma, obtenida en cada unidad de tiempo a lo largo de todo el proyecto, de los cuadrados de las diferencias entre las cargas totales que corresponden a las dos asignaciones.* Partiendo de este postulado, el algoritmo propuesto busca la nivelación de los recursos a lo largo del proyecto, minimizando el sumatorio de los cuadrados de las cargas de dichos recursos por unidad de tiempo[12]; veamos por qué. Si denominamos Cd_i a la carga diaria en la unidad de tiempo i, y R a la cantidad total de recursos que se consumirá durante la ejecución del proyecto, la carga ideal sería la media de dicho consumo, es decir: $\overline{Cd} = \sum_{i=1}^{Dp} Cd_i/Dp = R/Dp$. Y planteando las condiciones del postulado de Boss:

$$\text{mín} \sum_{i=1}^{Dp} (Cd_i - \overline{Cd})^2 = \text{mín} \sum_{i=1}^{Dp} (Cd_i^2 + \overline{Cd}^2 - 2Cd_i\overline{Cd}) =$$

$$= \text{mín} \left(\sum_{i=1}^{Dp} Cd_i^2 + \sum_{i=1}^{Dp} \overline{Cd}^2 - 2\overline{Cd} \sum_{i=1}^{Dp} Cd_i\right)$$

Si se analiza el tercer miembro de la igualdad anterior, se puede observar que los dos últimos términos son constantes, por lo que minimizando la suma de los cuadrados del consumo diario, se consigue minimizar el sumatorio del cuadrado de la diferencia entre el consumo programado y el ideal, como proponen Burgess y Killebrew.

Para aplicar este método se parte del gráfico de Gantt del proyecto, en el que se han situado las actividades ordenándolas de arriba abajo según el subíndice de denominación, es decir, primero se situará la 1-2, a continuación la 1-3, ..., hasta terminar con todas las que salen del suceso 1. Después se sigue con el 2, comenzando con la 2-3, después la 2-4, etc., y así, sucesivamente hasta colocar todas las actividades del proyecto. Una vez situadas todas las tareas, el proceso de nivelación comienza por el final, desplazando, período a período, la primera actividad que tenga holgura, calculando en cada momento el efecto obtenido en la suma de los cuadrados de la carga y dejándola en el lugar donde el sumatorio calculado sea mínimo; a igualdad de sumatorios se colocará en la posición más a la derecha posible, a fin de dejar la máxima holgura para las tareas precedentes. A continuación se realiza la misma operación con la segunda actividad que tenga holgura, y

[12] Tomado de Ortigueira (1976, pág. 148).

así, sucesivamente, hasta haber barrido todas las tareas no críticas del proyecto. Seguidamente se realiza otra vez la misma operación, pero estudiando ahora los posibles desplazamientos a la izquierda; después otra vez a la derecha, etc., continuando este proceso hasta que se dé una vuelta completa sin mover ninguna actividad; entonces se habrá llegado a la mejor distribución de recursos de acuerdo con el método empleado (ver Ejemplo 10.6).

Ejemplo 10.6. Nivelación de recursos en un proyecto (método de Burguess-Killebrew)

La programación de un determinado proyecto está reflejada en la Figura 10.15, donde para cada actividad aparece la duración de la misma (d_{ij}) y el número de operarios necesarios para su realización (r_{ij}) en la forma d_{ij}/r_{ij}. El objetivo perseguido es nivelar la necesidad de mano de obra diaria.

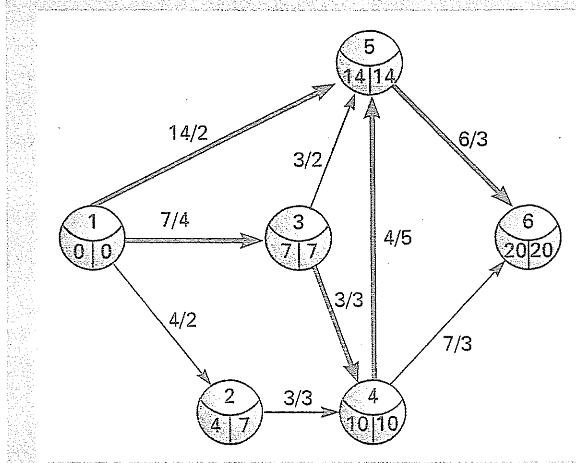


Figura 10.15. Grafo PERT para nivelación de recursos.

Es necesario conocer la necesidad diaria de mano de obra que genera la realización del mencionado proyecto, para lo que se construirá el gráfico de cargas del mismo (Figura 10.17) a partir del Gantt que se obtiene situando todas las actividades en su fecha más temprana de comienzo (Figura 10.16).

En el gráfico de Gantt se han representado las actividades, situándole en su principio y fin el número del suceso de salida y de llegada, respectivamente; igualmente sobre ellas, encerrado en un círculo, el número de hombres que necesitan para su realización. Las de trazo grueso son las críticas y las holguras de las diferentes actividades son las que aparecen con trazo discontinuo. El gráfico de cargas que genera esta programación es el

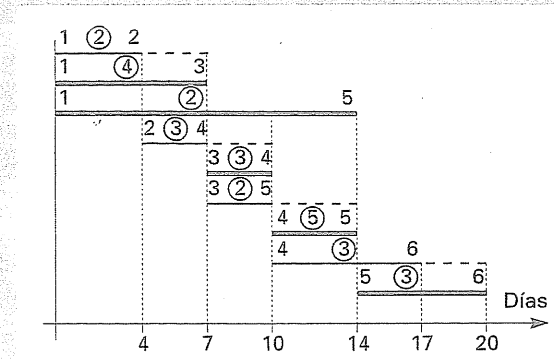


Figura 10.16. Diagrama Gantt del proyecto.

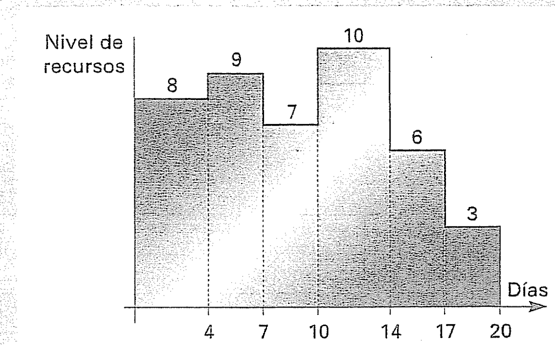


Figura 10.17. Gráfico de cargas del proyecto.

que aparece en la Figura 10.17, donde se puede ver el número de hombres que hará falta cada uno de los 20 días que tiene estipulado como duración el proyecto. Si ordenamos estas necesidades día a día el resultado sería:

8 8 8 8 9 9 9 7 7 7 | 10 10 10 10 6 6 6 | 3 3 3

Si se desplaza la actividad 4-6 (marcado su plazo de ejecución dentro del recuadro) un día hacia la derecha, es decir, se comienza el día 11 y se finaliza el 18, el consumo de carga diario sería:

8 8 8 8 9 9 9 7 7 7 7 | 10 10 10 6 6 6 6 | 3 3

De esta forma vamos a representar los diferentes desplazamientos posibles a la hora de aplicar el algoritmo de Burgess-Killebrew, añadiéndole a la derecha otra cifra que corresponderá a la suma de los cuadrados de dichas cargas diarias.

En la Tabla 10.7 se puede observar que, de todas las posiciones posibles, la que genera el mínimo de la suma de los cuadrados de las cargas es la que la sitúa lo más a la derecha posible, luego elegimos esta posición y, a partir de ahí, desplazaremos la siguiente que lo permita, en este caso la 3-5, que generará un movimiento diario de dos unidades, dando lugar a la Tabla 10.8, en la que podemos ver que la mejor posición es la de partida, luego, a partir de ésta, movemos la 2-4, cuyo resultado se puede apreciar en la Tabla 10.9, la cual nos indica que no se debe desplazar, lo que impide el movimiento de la 1-2, ya que al estar fija la 2-4 no le deja holgura para ese posible desplazamiento.

Tabla 10.7. Desplazamiento de la actividad 4-6

8	8	8	8	9	9	9	7	7	7	10	10	10	10	6	6	6	3	3	3	1181
8	8	8	8	9	9	9	7	7	7	7	10	10	10	6	6	6	6	3	3	1157
8	8	8	8	9	9	9	7	7	7	7	7	10	10	6	6	6	6	6	3	1133
8	8	8	8	9	9	9	7	7	7	7	7	7	10	6	6	6	6	6	6	1109

Tabla 10.8. Desplazamiento de la actividad 3-5

8	8	8	8	9	9	9	7	7	7	7	7	7	10	6	6	6	6	6	6	1109
8	8	8	8	9	9	9	5	7	7	9	7	7	10	6	6	6	6	6	6	1117
8	8	8	8	9	9	9	5	5	7	9	9	7	10	6	6	6	6	6	6	1125
8	8	8	8	9	9	9	5	5	5	9	9	9	10	6	6	6	6	6	6	1133
8	8	8	8	9	9	9	5	5	5	7	9	9	12	6	6	6	6	6	6	1145

Tabla 10.9. Desplazamiento de la actividad 2-4

8	8	8	8	9	9	9	7	7	7	7	7	7	10	6	6	6	6	6	6	1109
8	8	8	8	6	9	9	10	7	7	7	7	7	10	6	6	6	6	6	6	1115
8	8	8	8	6	6	9	10	10	7	7	7	7	10	6	6	6	6	6	6	1121
8	8	8	8	6	6	6	10	10	10	7	7	7	10	6	6	6	6	6	6	1127

Una vez acabado este primer ciclo de movimientos, habría que comenzar de nuevo, pero ahora desplazando las actividades hacia la izquierda, utilizando el mismo criterio de elegir las posiciones que generen la mínima suma de los cuadrados de las cargas. En nuestro caso no lo haremos ya que el único desplazamiento que podríamos estudiar sería el de la actividad 4.6, que generaría una tabla similar a la 10.7, de lo que deduciríamos que la mejor posición es la que tenemos en la actualidad. Como el resto de las actividades están situadas lo más a la izquierda posible tampoco se podrían mover, con lo que la mejor solución que podemos ofrecer es justamente la indicada por la Tabla 10.7, cuyo Gantt se ha representado en la Figura 10.18, el cual genera el gráfico de cargas de la Figura 10.19.

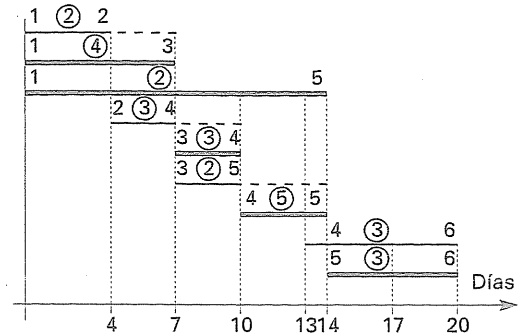


Figura 10.18. Diagrama Gantt del proyecto nivelado.

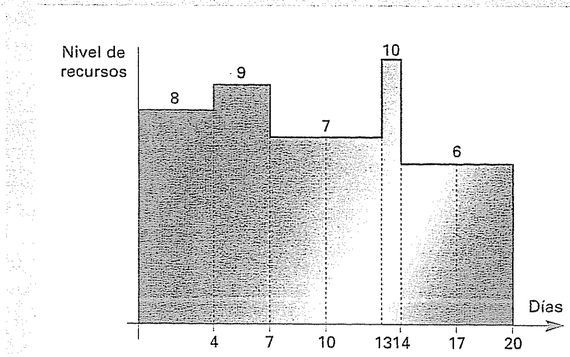


Figura 10.19. Diagrama de cargas del proyecto nivelado.

La nivelación soluciona el problema de homogeneizar el consumo de recursos de un proyecto. En el desarrollo de este apartado se ha supuesto que se dispone de los recursos necesarios para su ejecución y sólo para un tipo de recurso. En caso de que se quisiera nivelar el consumo de todos los tipos de recursos que necesita un determinado proyecto, el proceso a seguir sería el estudiado anteriormente, pero dando una cierta «prioridad» a cada uno de aquéllos, es decir, en primer lugar se nivelaría el recurso que se considere más importante o vital para el desarrollo del proceso; a continuación se pasaría al siguiente recurso prioritario, pero sin efectuar ningún movimiento en aquellas actividades que consuman recursos del primer tipo, ya que cualquier traslado de alguna de ellas desnivelaría lo conseguido para el primer recurso. De forma general se puede decir que para nivelar un recurso quedarán inmóviles todas aquellas actividades que consuman recursos ya nivelados[13].

10.8.2. La programación con recursos limitados

Para conseguir programar los proyectos con recursos limitados existen dos enfoques fundamentales, el heurístico y el optimizador. Por diversas razones es el primero el más ampliamente utilizado:

- Aún hoy es la única vía para atacar la complejidad y el tamaño de los problemas, frecuentemente no lineales, que aparecen en la gestión de proyectos.
- A pesar de los enormes avances conseguidos por la informática y por los procedimientos optimizadores, estos últimos no son aún capaces de manejar la talla y complejidad de muchos proyectos reales.
- Aunque las soluciones heurísticas no son óptimas, son, en general, suficientemente buenas para conseguir los objetivos perseguidos.

[13] Para llevar esto a cabo, las actividades se suponen programadas a intensidad constante, es decir, con un consumo homogéneo de recursos a lo largo de toda su ejecución.

- Los paquetes de software disponibles permiten desarrollar rápidamente distintas posibilidades de programación y, con ello, facilitar la elección de la más conveniente.

La mayor parte de los métodos heurísticos parten de una programación PERT o PERT-Calendario, analizando los recursos necesarios uno a uno y período a período. Si la capacidad disponible de un cierto recurso es suficiente, se sigue adelante y se asigna la sobrante a otros proyectos o a futuras tareas del que se está programando; en caso contrario, el recurso se va asignando a las distintas actividades que aparecen en dicho período en función de alguna regla de prioridad, las cuales dependen del método empleado. Cuando un recurso se agota y quedan aún actividades por realizar, éstas se retrasan un período para ser objeto de asignación posterior. Las reglas más utilizadas son (Meredith y Mantel, 1989, página 340):

- *Comenzar con la tarea más corta*, lo cual pretende maximizar el número de tareas en curso.
- *Comenzar por lo que emplee más cantidad de recurso*, que presume que el consumo está relacionado con la importancia de la tarea.
- *Comenzar por la de menor holgura*, que pretende asegurar el cumplimiento de la duración prevista del proyecto.
- *Poner aquella que precede a un mayor número de actividades críticas*, lo cual intenta evitar posibles retrasos en el proyecto.
- *Poner aquella que precede a un mayor número de actividades*, sean críticas o no.

Estas y otras prioridades son usadas en este contexto, lo cual no es más que una adaptación de la programación en un entorno productivo de trabajo sobre pedido, *job-shop* (ver Apartado 9.5.2.2.). Aunque, en general, los distintos métodos pueden emplear una combinación de reglas, lo más común es tomar una como principal y una segunda para deshacer casos de igualdad. A pesar de que los trabajos empíricos no siempre muestran resultados coincidentes al evaluar las reglas, parece haber consenso en que la regla de la menor holgura suele dar la mejor solución o estar muy cerca de ello, dando raramente pobres resultados. Normalmente da lugar al menor retraso en el proyecto, al mejor uso de las instalaciones y al menor tiempo de ocupación del sistema total (Ibídem, pág. 341).

Aunque la heurística expuesta es probablemente la más utilizada, existen otras, algunas de las cuales funcionan de forma similar. Una de ellas comienza asignando desde el final del proyecto a partir de las fechas más tardías de terminación, dando así más flexibilidad a la asignación de recursos a las actividades situadas al principio y a la mitad del proyecto; ello asume la hipótesis de que así aumenta la probabilidad de que dichas tareas se terminen a tiempo y dentro de presupuesto, lo cual conllevaría un incremento de la probabilidad de que ocurra lo mismo con las tareas finales.

Otros métodos utilizan un enfoque *branch and bound*, el cual, a través de un «árbol de búsqueda», genera una amplia variedad de soluciones, descartando las no factibles y aquellas otras que, aunque factibles, sean pobres. De esta forma se va estrechando el conjunto de soluciones factibles y buenas, pudiéndose llegar, si el árbol no es demasiado grande, a encontrar soluciones óptimas. Para ello se hace necesario mayor tiempo de búsqueda en el ordenador (Turban y Meredith, 1988).

La mayoría de las técnicas heurísticas, por no decir todas, han sido diseñadas para su utilización con ordenador, por lo que sus modos de operar no son fácilmente conocidos al estar protegidos por las compañías que lo desarrollaron. A título de ejemplo, describimos uno del que se conoce bien su funcionamiento, conocido como ROC 8001[14], desarrollado por la Richfield Oil Company, y cuyo criterio de asignación es (Ortigueira, 1976, pág. 162):

- Asignar prioritariamente los recursos a las actividades críticas.
- Destinar los recursos sobrantes de la aplicación anterior a las actividades no críticas de menor a mayor holgura.
- Acudir siempre que sea necesario y posible a la programación intermitente de las actividades.
- Cuando los niveles de carga no sean satisfactorios, se aumenta la duración del proyecto y se repite el proceso.

Básicamente, este criterio es el usado por otros algoritmos, como se puede ver en el propuesto por Wiest y Levy (1972, págs. 143-152), que lo hacen período a período, dando prioridad a las actividades críticas y dedicando los recursos sobrantes al resto de tareas que se pueden realizar en esa misma etapa, teniendo en cuenta las holguras de las mismas (ver Ejemplo 10.7).

EJEMPLO 10.7. Compatibilización de recursos en un proyecto con el método de Wiest y Levy

Para el desarrollo de este ejemplo vamos a partir del proyecto descrito en el ejemplo anterior una vez ya nivelado, es decir, de la situación representada en las Figuras 10.18 y 10.19, pero suponiendo que tan sólo disponemos de ocho operarios para la realización del mismo. Debido a esta condición, se puede apreciar en el diagrama de cargas que no existen recursos suficientes, ya que, entre los períodos 4 y 7, hace falta un operario suplementario y el día 13, con unas necesidades iguales a 10, faltarían dos.

Se comienza la asignación con todas aquellas actividades que puedan empezar en el instante cero: en nuestro caso, las 1-2, 1-3 y 1-5. Todas ellas se pueden realizar ya que, en total, necesitan ocho operarios; esta asignación será válida hasta el día 4, en que finaliza la 1-2 y tendría que comenzar la 2-4, pero esto último no será posible ya que no existen recursos para esta última. Ello es debido a que necesita tres operarios y tan sólo se dispone de dos, ya que los seis restantes están asignados a las actividades 1-3 y 1-5, ambas críticas, por lo que tienen prioridad a la hora de utilizar los recursos. Habría que esperar hasta el día 7, en que finaliza la 1-3, liberándose así cuatro operarios. En esta situación, dicho día se continuará con la 1-5 y se comenzará la 3-4, que también es crítica; entre ambas utilizan cinco operarios, dejando libres tan sólo tres para las actividades 2-4 y 3-5, que son susceptibles de comienzo en función de sus fechas. Los recursos libres serán asignados a la 2-4, ya que en este instante es crítica al haberse desplazado a lo largo de toda su holgura, necesitando los tres operarios que estaban libres. Por tanto, la 3-5 tendrá que esperar, como mínimo hasta el instante 10, en que finalizarían la 2-4 y 3-4, para así poder utilizar los operarios adscritos a dichas tareas. El día 10 se utilizan siete obreros para realizar las dos actividades críticas que existen en ese momento, la 1-5 y la 4-5, luego tan sólo sobra uno, lo que impide la ejecución de la 3-5, así cómo de la 4-6, cuyo comienzo podríamos adelantar, aunque destruyendo la nivelación realizada. Con esta misma asignación nos encontramos el día 11, en el que la 3-5 se ha transformado en crítica, no existiendo recursos para ella, por lo que el proyecto tendrá que retrasarse (como mínimo en 3 días, que son los que faltan para que finalicen las actividades que se están ejecutando en este período). Algo similar sucede el día 13, en el que tendría que comenzar la 4-6, no pudiendo hacerlo, ya que también necesita tres operarios, los cuales no están disponibles. Nos encontramos, por tanto, en el día 14, en el que se comenzarán las tareas 3-5 y 4-6. La actividad 5-6 no se puede realizar, ya que, aunque necesita tres operarios,

[14] Para una aplicación de este caso, así como para el caso de proyectos repetitivos, aconsejamos la lectura de J. A. D. Machuca y otros (1990, págs. 448-473).

que están libres, se tiene que cumplir la relación de prelación que obliga a finalizar previamente la 3-5; ésta, como se ha dicho, comienza en este instante, por lo que se terminará el día 17, momento en que podrá empezar la 5-6, que terminará el día 23, dándose por terminado el proyecto. La programación sería la que aparece en la Figura 10-20, la cual origina el diagrama de cargas de la Figura 10.21.

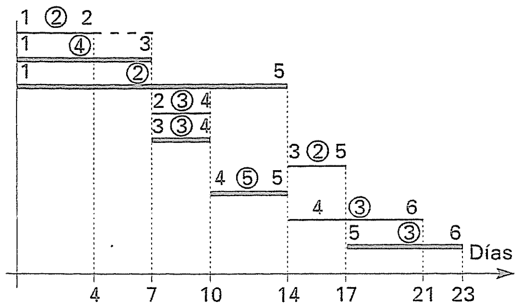


Figura 10.20. Diagrama Gantt del proyecto una vez asignados los recursos.

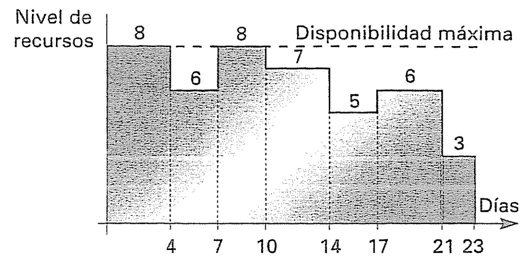


Figura 10.21. Diagrama de cargas del proyecto una vez asignados los recursos.

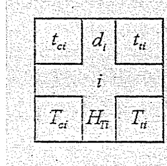
Si en el caso más simple, el proceso de nivelación y compatibilización de recursos es tedioso y complejo, éste se complica cuando nos encontramos con casos en que las disponibilidades de algunos recursos no sean uniformes en el tiempo, lo cual es frecuente en la práctica. El ordenador resulta, entonces, un instrumento de valor inestimable (ver Apartado 10.12).

10.9. EL METODO ROY

Todo lo expuesto hasta ahora ha sido basado en los grafos de tipo PERT/CPM, pero, como se comentó en la introducción de este capítulo, existen otros. De entre ellos cabe destacar el método ROY, que difiere bastante de los grafos estudiados, pues en esta técnica los nudos representan las actividades, y los arcos que los unen tienen un significado exclusivamente de prelación.

El nudo más utilizado es el que aparece en la Figura 10.22, donde se recoge gran información de la tarea en cuestión.

Para construir el grafo se comienza por el **nudo inicio del proyecto**, de duración nula, al que seguirán todas aquellas tareas que no tengan ningún antecedente. A continuación se irán situando el resto de las actividades, haciéndose cumplir las relaciones de prelación establecidas y llegando al final a una serie de tareas



i: Tarea i.
d_i: Duración de la tarea i.
H_{Ti}: Holgura total de la tarea i.
t_{ci}: Fecha más temprana de comiezo de la tarea i.
t_{ti}: Fecha más temprana de terminación de la tarea i ($= t_{ci} + d_i$).
T_{ci}: Fecha más tardía de comienzo de la tarea i ($= T_{ti} - d_i$).
T_{ti}: Fecha más tardía de terminación de la tarea i.

Figura 10.22. Nudo ROY.

que no tienen siguientes; de todas ellas tendrá que salir una flecha hacia un **suceso** ficticio que representará el **final del** citado **proyecto**, el cual no tendrá, como es lógico, duración alguna.

Una de las ventajas que este método presenta, frente al PERT, es permitir la utilización de **nuevos tipos de relaciones** que pueden resultar de gran utilidad. Citaremos **las de tipo no estricto** y **las** denominadas **negativas**, que se ilustrarán en el Ejemplo 10.8. Otra ventaja adicional es que no utiliza actividades ficticias, facilitando la construcción e interpretación del grafo.

EJEMPLO 10.8. Programación mediante el método ROY

Como caso ilustrativo vamos a realizar el grafo ROY correspondiente al enunciado del Ejemplo 10.1, dando lugar a la Figura 10.23, en el que el cálculo de las fechas se ha realizado comenzando por las más tempranas de comienzo y fin para cada una de las actividades. Así, por ejemplo, *A*, *B* y *C* tienen como fecha de comienzo el

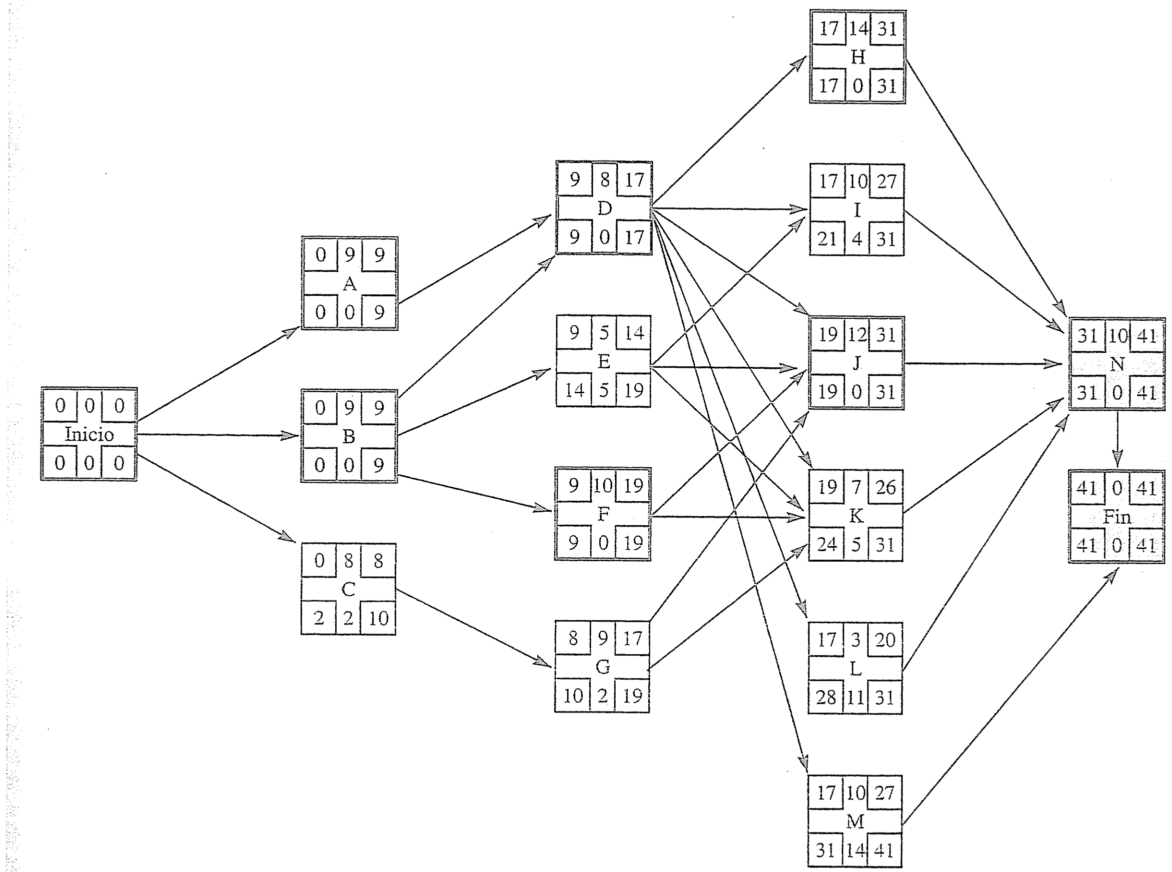


Figura 10.23. Grafo ROY de un proyecto.

instante cero; si a dicho momento le sumamos la duración de las mencionadas tareas, tendríamos, respectivamente, 9, 9 y 8 como fecha más temprana de terminación de las mismas. Para que comenzara la *D*, tienen que estar acabadas *A* y *B*, luego su fecha más temprana de comienzo será el máximo de las fechas más tempranas de terminación de dichas actividades (en este caso 9); se seguiría así hasta llegar a la fecha más temprana de terminación del suceso final que, en este caso marcará la duración del proyecto. Al igual que hacíamos en el grafo PERT, se hará coincidir la fecha más tardía de terminación del proyecto con la más temprana y se volverá hacia el nudo inicial calculando las fechas más tardías de comienzo y de terminación de cada una de las actividades. Deberá tenerse en cuenta que esta última, para una tarea concreta, será el mínimo de las fechas más tardías de comienzo de las actividades que le siguen, las cuales se calculan como la fecha más tardía de terminación de la actividad en cuestión menos su duración. Por ejemplo, en el caso de la tarea *E*, la fecha más tardía de terminación será el mínimo de 21, 19 y 24, fechas más tardías de comienzo de las actividades *I*, *J* y *K*, que son las siguientes a *E*; por tanto, ésta podrá comenzar, como muy tarde, el período 14, diferencia entre 19 (fecha más tardía de terminación) y 5 (duración de la actividad).

Una de las ventajas que decíamos presentaba este tipo de grafo es la posibilidad de poder representar *sucesiones de tipo no estrictas y restricciones negativas*. Como ejemplo de la primera de ellas, supondremos que *G* puede comenzar 3 días después de haber comenzado la *C*, por tanto la fecha de comienzo más temprana para la *G* no sería 8, sino 3, por lo que su finalización sería el período 12. La representación gráfica aparece en la Figura 10.24.

Si, además, se le impone la condición de que no se puede iniciar más de siete períodos después de haber comenzado la *C*, estaremos en un caso de *sucesión no estricta* y *restricción negativa*, por lo que habría que modificar las fechas más tardías, si no cumplen esta última condición. Como *G* tiene que comenzar como muy tarde el día 10, la *C* tendría que hacerlo, para cumplir el plazo de los 7 días máximos de diferencia, el día 3; pero además sabemos que la diferencia entre las dos fechas de comienzo pueden ser como mínimo de 3 días, luego podría comenzar el 10 − 3 = 7. Entre estas dos fechas posibles, 3 y 7, tomaremos la mayor, ya que se está calculando la fecha más tardía de comienzo. La representación correspondiente aparece en la Figura 10.25.

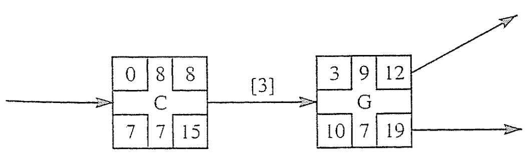


Figura 10.24. Representación de sucesión no estricta.

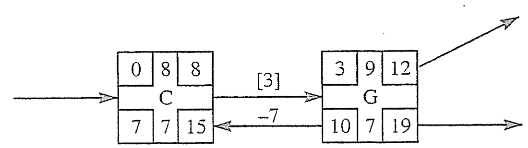


Figura 10.25. Representación de sucesión no estricta y restricción negativa.

10.10. REDES DE ACTIVIDAD GENERALIZADAS

En las programaciones realizadas hasta el momento no se ha tenido en cuenta la posibilidad de tener que repetir una determinada actividad porque su realización no fuese satisfactoria, o bien la existencia de actividades que pueden no ser necesarias para la consecución del proyecto porque dependan del grado de conformidad que exista con la ejecución de alguna tarea anterior.

Estas circunstancias no pueden ser representadas en los grafos que hemos estudiado hasta aquí, siendo necesario recurrir a las **redes de actividad generalizadas**. La composición de estas redes es similar a la del PERT, con la misma interpretación de los nudos y de los arcos, es decir, sucesos y ejecución de tareas, respectivamente. Aquí los nudos tienen, igualmente, una doble función, la de emisor (de salida) y la de receptor (de entrada), pero pudiendo existir diferentes tipos, cada uno con una determinada simbología (ver Fig. 10.26, elaborada a partir de Serrano (1982, pág. 59)).

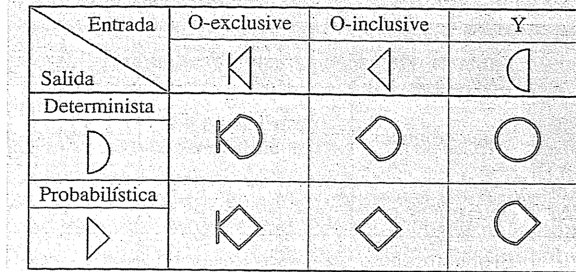


Figura 10.26. Tipos de nudos GAN.

Respecto a la función receptora se distinguen:

- **Nudo «*Y*»**. El suceso que representa se verifica si, y sólo si, se ejecutan por completo todas las actividades que inciden en él.
- **Nudo «*O*-exclusive»**. Este se realiza cuando se ejecuta una, y sólo una, de las tareas incidentes.
- **Nudo «*O*-inclusive»**. El suceso por él representado se dará cuando se realice al menos una de las tareas incidentes.

Considerando la función emisora nos encontramos con dos tipos de nudos:

- **Nudo determinista**, caracterizado por la condición de que, si éste se realiza, se han de ejecutar todas las actividades que salen de él.
- **Nudo probabilístico**, que implica la realización de sólo una de las tareas salientes; los arcos representativos de estas tareas tienen cada uno una determinada probabilidad de realización, cuya suma ha de ser la unidad.

Con respecto a los arcos, en GAN están dotados de una serie de parámetros al igual que en PERT (duración, costes, consumos de recursos, etc.), pero, además, tienen uno que les es característico: su probabilidad de realización, *P*, y la distribución a la que responde. Esta tendrá, lógicamente, un valor comprendido entre 0 y 1; en el caso de que dicho valor fuese la unidad, el nudo sería, claro está, determinista.

Al igual que en los grafos PERT, un arco puede representar la agregación de un conjunto de actividades, en las redes GAN se utiliza la noción de **arco equivalente** de la subred, el cual tiene la misma probabilidad de realización y duración que la subred que sustituya, con lo que se simplifica en gran medida la aplicación de los diferentes algoritmos de resolución existentes.

Una aproximación a la resolución de una red GAN es la técnica GERT (*Graphical Evaluation and Review Technique*), cuya idea básica es que la probabilidad de alcanzar el nudo final de la red es una función multiplicativa de las probabilidades de realización de las tareas intermedias (Serrano, 1982, pág. 59)[15]. El Cuadro 10.1 ilustra este tipo de técnica. Aunque, como veremos, el análisis que permite es mucho más rico que el de las redes PERT, también es cierto que la información requerida, el esfuerzo computacional y la complejidad de uso es muy superior. La elección de una u otra técnica dependerá de las necesidades del proyecto.

[15] Ejemplos resueltos con esta técnica se pueden ver en J. A. D. Machuca y otros (1990, Capítulo 13).

Cuadro 10.1. Redes GERT

Tabla 10.10. Comparación de algunas características de las redes PERT/CPM y GERT[16]

	Tipos de nudos	Distribución de las duraciones	Posibilidad de volver a sucesos anteriores	Control	Arcos
PERT/CPM	Determinísticos	β	No existe	Fácil	Tiempo
GERT	Probabilísticos	Diversas	Existe	Difícil	Tiempo, coste, fiabilidad, etc.

La Figura 10.27 muestra un ejemplo sencillo de red GERT. En ella, la actividad *A* es la salida de un proceso de manufactura; ésta pasa a una primera inspección que revela un 10 por 100 de defectuosos (→ actividad *B*) y un 90 por 100 de items satisfactorios (→ actividad *C*). En el primer caso se pasaría a un reprocesamiento, al que seguiría (actividad *D*) una nueva inspección; si ésta es superada (probabilidad 0,8) se procedería (actividad *E*) al acabado de los items aceptados (80 por 100 del 10 por 100 rechazado = 8 por 100). Los componentes rechazados (probabilidad 0,2) en la segunda inspección (20 por 100 del 10 por 100 = 2 por 100) pasan a desechos (actividad *F*). En el segundo caso, los productos aceptados tras la primera inspección pasan al proceso de acabado (actividad *C*). Del conjunto de items en este último proceso, el 70 por 100 necesita 8 horas de trabajo; el 20 por 100 requiere 8,5 horas y el 10 por 100, 9 horas (actividades *G*, *H* e *I*). Todos ellos van a inspección final, la cual desecha el 5 por 100 del *input* (5 por 100 del 98 por 100 = 4,9 por 100), que va a desechos (actividad *J*), pasando el resto (95 por 100 del (90 por 100 + 8 por 100) = 93,12 por 100) a items terminados.

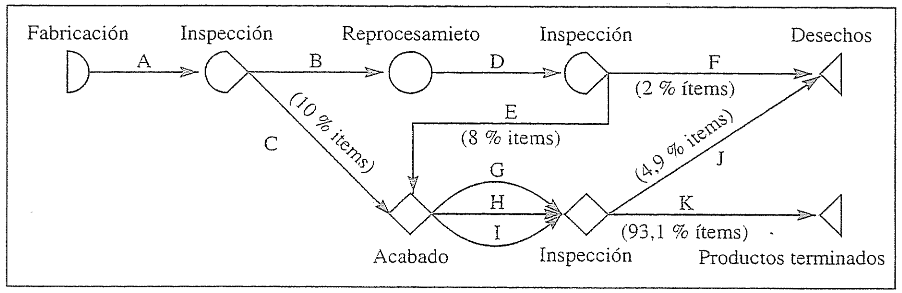


Figura 10.27. Red GERT.

10.11. ALGUNAS NOTAS SOBRE LA IMPLEMENTACION DE PROYECTOS

La implementación de un proyecto es algo más que señalar las actividades críticas y hacer un seguimiento del mismo, pues ésta implica (Spinner, 1992, págs. 141-142):

- Gestión de los recursos humanos adscritos al proyecto.
- Gestión y control de los costes para alcanzar las metas establecidas (considerada por muchos la función más importante).

[16] Para un estudio de la resolución de estas redes, aconsejamos la lectura del Capítulo 8 de Serrano, 1993.

- Comprensión del alcance del proyecto en relación con los objetivos del contratante del mismo.
- Gestión de la comunicación entre los miembros del equipo del proyecto.
- Gestión de la calidad del proyecto con objeto de asegurar la del proyecto o servicio resultante.

Para comenzar el desarrollo de un proyecto, el producto o productos finales a obtener se subdivide en subconjuntos; éstos, a su vez, en partes más detalladas, y así sucesivamente, disminuyendo el grado de complejidad y el valor económico de los mismos, hasta llegar a un nivel manejable para la planificación y el control. Por su parte, estas unidades de planificación y control se descomponen en «**paquetes de trabajo principales**» (PTP) (por ejemplo: ingeniería, control, etc.), cuya responsabilidad se asigna a las correspondientes unidades; éstas, a su vez, pueden subdividirse, si su complejidad lo aconseja, en paquetes más simples (PT) (por ejemplo: ingeniería → ingeniería eléctrica, ingeniería mecánica, etc.). Estos últimos son las unidades básicas para la planificación de recursos y control del sistema PERT-Coste, pues mayor detalle encarecería innecesariamente el proceso. El número de subdivisiones va a depender del valor económico de los PTP y del detalle necesario para controlar el trabajo. Por último, los paquetes de trabajo del nivel más bajo suelen fraccionarse en actividades concretas, que son las que aparecerán representadas en el grafo, aunque a veces un arco puede representar un PT, dándose, pues, diferentes grados de agregación de acuerdo con las necesidades del planificador en relación con la complejidad del proyecto (Ibidem, págs. 175-176). También es importante hacer notar que, cuando un determinado PT no esté dirigido concretamente a la consecución de una cierta etapa o suceso del proyecto, no será necesario representarlo en el grafo, pues ello le añadiría complejidad sin servir de ayuda en la programación.

A partir de lo anterior puede establecerse el grafo, la consiguiente programación, la estimación de costes y, en su caso, la aprobación de plan, programa y presupuesto; hecho esto se pasaría a la ejecución. A medida que ésta avanza nos encontramos con actividades terminadas, en curso (retrasadas o no), etc.; también pueden haberse añadido otras nuevas o eliminado algunas tareas, haber cambiado los costes o los recursos disponibles y necesarios, etc. En suma, se hará necesario *un control y una actualización periódica* de forma que la planificación y programación reflejen las cambiantes circunstancias. A la vista del estado del proyecto y de su evaluación, el responsable del proyecto tomará las decisiones pertinentes, por ejemplo (Ibídem, págs. 180-182):

- Ajustar la programación en función de las holguras existentes, de forma que se minimicen las acciones de ajuste de capacidad (por ejemplo: horas extras y contratación, etc.).
- Reasignar fondos y recursos a áreas críticas desde zonas menos problemáticas.
- Incrementar o reducir los recursos planificados.
- Revisar la secuencia o/y contenido de las tareas (por ejemplo, modificando especificaciones o métodos).

Con todo ello se aprobaría el nuevo plan y se volvería a la etapa inicial. En conjunto, el sistema PERT-Coste puede representarse como un doble ciclo de planificación y control, que se resume en la Figura 10.28[17].

[17] A partir de Meredith y Mantel (1989, pág. 291).

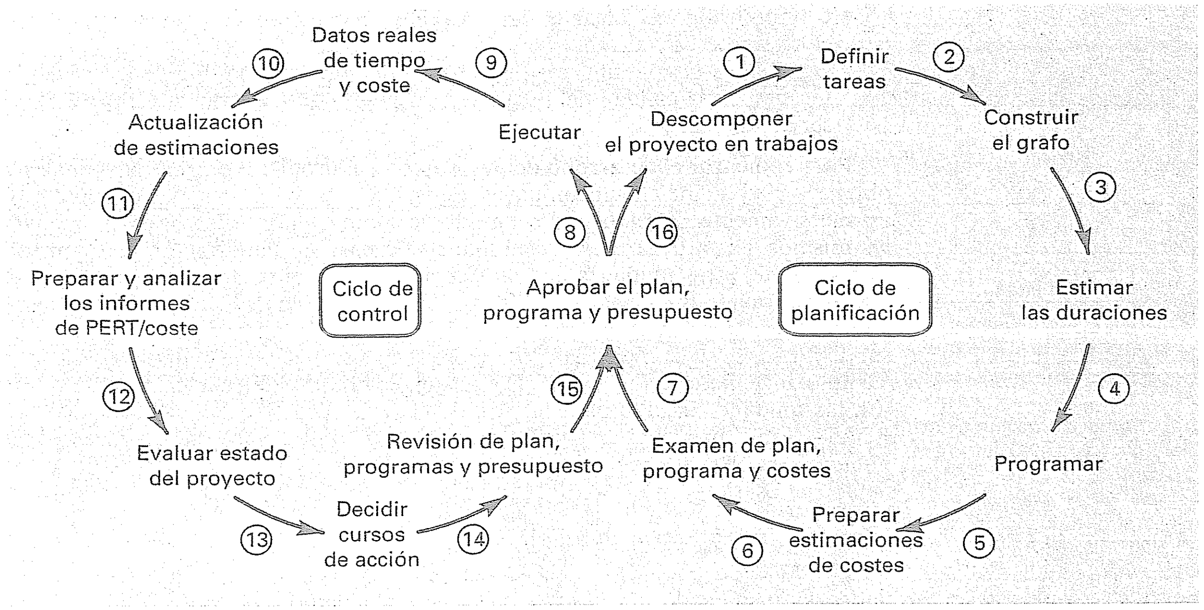


Figura 10.28. Ciclo de planificación y control.

10.12. EL USO DE LA INFORMATICA EN LA PLANIFICACION, PROGRAMACION Y CONTROL DE PROYECTOS

De lo hasta aquí expuesto se deduce claramente que cuando un proyecto alcanza un cierto grado de complejidad, lo cual es algo bastante común en la vida real, su planificación, programación y control se vuelven impracticables con métodos manuales. El uso de la informática será o no necesario en función del tamaño y complejidad del proyecto, del tipo de análisis requerido (por ejemplo: consideración o no de costes y recursos) y de la frecuencia necesaria en la actualización del mismo. Las ventajas derivadas del empleo de métodos informáticos son claras y, entre ellas, pueden citarse (Spinner, 1992, pág. 117):

- El equipo del proyecto dispone de más tiempo para dedicarse a problemas fundamentales.
- Una clara mejora en la programación y el control.
- La actualización del proyecto requiere menos tiempo y personal.
- Los errores derivados del trabajo normal son prácticamente eliminados.
- Se disminuye el riesgo asociado al retraso del proyecto, pues, al existir la capacidad de simulación de sus consecuencias, éstas pueden ser previstas y pueden tomarse las acciones pertinentes.
- Los equipos del proyecto disponen de un método claro para pensar y tomar decisiones sobre el proyecto.

En 1992 existían alrededor de 250 programas de ordenador para gestión de proyectos en entorno PC elaborados por compañías de software, además de los diseñados por las empresas de hardware para trabajar con los propios equipos.

Aunque la mayoría de los programas son de uso «amigable», en general es conveniente participar en algunas sesiones de adiestramiento que faciliten su empleo por parte del usuario. Spinner (Ibídem, págs. 118-119) presenta una lista de software estadounidense para sistema operativo MS-DOS, la cual resumimos en el Cuadro 10.2 en base a su facilidad de uso, claridad en los informes, flexibilidad de los mismos, etc.

Cuadro 10.2. Algunos paquetes informáticos para la gestión de proyectos en entorno PC[18]

Producto	Project Workbench Advanced	Super Project Plus	Plan TRAC II	Prestige	Artemis Project	Microsoft Project	Primavera Project Planner	Pertmaster Advance
Empresa	Applied Business Technology	Computer Associates International, INC	Computerline, INC	Metler Management Systems	Metler Management Systems, INC	Microsoft CORP.	Primavera Systems, INC	Projectronics, INC
Precio en $ (aproximado)	1.250	495	1.000	2.995	3.500	495	2.500	1.495

Producto	Quicknet Professional	Timeline 3.01	Antemis 7000	Project/2	Expert Vision	Vire	Optima 1100
Empresa	Proyect Software & Development, INC	Symanica	Metier Management Systems, INC	Proyect Software & Development, INC	Systonetics, INC	Technical Economics, INC	Unisys CORP
Precio en $ (aproximado)	1.575	595	27.500	1.675	45.000	30.000	30.000

10.13. CONSIDERACIONES FINALES

La planificación, programación y control de proyectos ha tenido y seguirá teniendo una importancia crítica, yendo en aumento el tamaño y la complejidad de los mismos y estando presentes en un amplio abanico de organizaciones. La dificultad de una correcta gestión es obvia, pues, si bien pueden existir posibles similitudes con algunos proyectos pasados que proporcionan un punto de partida, las diferencias siempre implicarán un alto riesgo en el mismo. Aunque pueda haber una cierta tendencia a contemplar los proyectos con un único objetivo, las páginas anteriores revelan que las metas a considerar son múltiples (tiempo, costes, resultados, etc.), existiendo entre ellas una clara interacción que dificulta la gestión, pues habrá que buscar el adecuado equilibrio entre las mismas. La gestión de proyectos tiene una dificultad añadida en tanto en cuanto está caracterizada por los conflictos, no sólo el derivado de los múltiples objetivos, sino los derivados de la competencia con otros proyectos para el uso de los recursos, de los cambios deseados por los clientes, de la interacción de diversas áreas empresariales, etc.

Como se indicó anteriormente, a lo largo de la vida de cualquier proyecto interactúan los distintos departamentos empresariales, sin que ninguno de ellos

[18] Adaptada de Spinner, 1992, pág. 174.

escape a la actividad que aquél implica. La intensidad de la participación de cada uno de ellos puede, sin embargo, variar a lo largo del mismo; así, **Marketing** estará especialmente involucrado al principio y al final, **Operaciones** tendrá un importante papel a todo lo largo del desarrollo, **Finanzas** se verá más concernida al principio, **Contabilidad** al final y durante los controles periódicos y **Personal** durante todo el proyecto. Será una misión fundamental del director del proyecto mantener la adecuada coordinación entre los distintos departamentos.

REFERENCIAS Y BIBLIOGRAFIA

Boss, J.: «Prise en consideration des contraintes pesant sur la disponibilité des moyens dans les methodes de chemin critique», *Revue Française de Recherche Operationnelle*, 38, 1966.

Bueno, Cruz y Durán: «Economía de la empresa», *Pirámide*, 1979.

Buffa, S.: «Dirección de operaciones», *Limusa Wiley*, 1973.

Burgess, A., y Killebrew, J.: «Variation in activity level on a cyclic arrow diagram». *Journal of Industrial Engineering*, vol. 13, 2, marzo-abril 1962.

Gallagher, C.: «A note on PERT assumptions», *Management Science*, octubre 1987.

Guerras, L. A.: «Gestión de empresas y programación multicriterio», *ESIC Editorial*, 1989.

Kauffmann y Gil Aluja: «Técnicas de gestión de empresas», *Pirámide*, 1992.

Larrañeta, J.: «Programación lineal y grafos», *Servicio de Publicaciones de la Universidad de Sevilla*, 1977.

Littlefield, T. K., y Randolph, P. H.: «An answer to Sasieni's question on PERT times», *Management Science*, octubre 1987.

Machuca, J. A. D., y otros: «El subsistema productivo de la empresa», *Pirámide*, 1990.

Martín, M.: «Métodos operativos de gestión empresarial», *Pirámide*, 1987.

Mayer, R.: «Gerencia de producción y operaciones», *McGraw-Hill*, 1975.

Meredith, J. R., y Mantel, S. J.: «Project management», *Prentice Hall*, 1989.

Ortigueira, M.: «Programación reticular. Métodos y aplicaciones», *ICE Ediciones*, 1976.

Romero, C.: «Técnicas de programación y control de proyectos», *Pirámide*, 1983.

Sasieni, M. W.: «A note on PERT times», *Management Science*, diciembre 1986.

Schroeder, R.: «Administración de operaciones», *McGraw-Hill*, 1992.

Serrano, F.: «Simulación de sistemas empresariales», *Servicio de Publicaciones de la Universidad de Cádiz*, 1993.

Serrano, F.: «Redes de actividad generalizadas», *Técnica Industrial*, 158, págs. 57-63, 1982.

Sierra, J.: «Métodos de investigación operativa en la práctica de las empresas», *Deusto*, 1973.

Spinner, M. P.: «Elements of project management», *Prentice Hall*, 1992.

Turban, E., y Meredith, J. R.: «Fundamentals of management science», *Business Publications*, 1988.

Wiest, J., y Levy, F.: «Técnicas PERT y CPM», *Paraninfo*, 1972.

Yu Chuen-Tao, L.: «Aplicaciones prácticas de Pert y CPM», *Deusto*, 1974.

Zaderenko, S.: «Sistemas de programación por camino crítico», *Mitre*, 1968.

ANEXO A LA PARTE PRIMERA

METODOS OPERATIVOS

I.1. INTRODUCCION A LA PROGRAMACION LINEAL[1]

Antes de entrar en el planteamiento y resolución del problema que nos ocupa, definiremos una serie de conceptos básicos, típicos de la programación lineal, los cuales utilizaremos a lo largo del presente apartado. Estos aparecen en el Cuadro I.1.

Cuadro I.1. Conceptos básicos

- **Factores productivos.** Medios empleados para la obtención de los diferentes productos (por ejemplo: materias primas, número de horas-hombre, etc.).
- **Factores productivos no limitados.** Aquellos que pueden emplearse en la cantidad deseada, sin ninguna restricción, durante el período a que se refiere el problema (por ejemplo: agua, luz, energía, etc.).
- **Factores productivos limitados,** A_i. Aquellos cuya cantidad no se considera ampliable durante el período en cuestión (por ejemplo: recursos financieros, capacidad e los talleres, etc.) y que, por tanto, dan lugar a restricciones en el problema a resolver.
- **Vector existencias,** P_0. Matriz columna cuyos componentes son las cantidades disponibles de cada uno de los factores limitados, A_i, es decir, para m factores distintos:

$$P_0 = \begin{vmatrix} A_1 \\ \cdots \\ A_i \\ \cdots \\ A_m \end{vmatrix} = |P_0| \qquad [1]$$

- **Técnica.** Una combinación determinada de los distintos recursos (por ejemplo: dos unidades de A_1, tres unidades de A_2, ..., una unidad de A_m).
- **Proceso productivo,** P_j. Es la transformación de los distintos factores productivos, de acuerdo con una técnica dada, para llegar a la obtención de un producto (o de parte de él).
- **Vector proceso,** P_j. Matriz columna cuyos componentes, a_{ij}, indican las cantidades necesarias de los diferentes factores productivos, A_i, para realizar el proceso P_j. Así, para m factores distintos:

$$P_j = \begin{vmatrix} a_{1j} \\ \cdots \\ a_{ij} \\ \cdots \\ a_{mj} \end{vmatrix} \qquad [2]$$

- **Nivel de un proceso,** x_j. Expresa la intensidad de utilización de los distintos factores productivos por parte del proceso P_j. Por ejemplo, si tomamos como **nivel unidad** el indicado por la expresión [2] y decimos que P_j se va a realizar a nivel $x_j = 5$, significa que el consu-

[1] Este apartado es un breve resumen de los puntos esenciales de los Capítulos 6 y 7 de J. A. D. Machuca y otros (1990).

mo de recursos para dicho proceso será cinco veces el indicado por P_j (supuesta una proporcionalidad lineal entre nivel y consumo), es decir:

$$\text{Consumo para } P_j = 5 \cdot P_j = \begin{vmatrix} 5a_{1j} \\ \cdots \\ 5a_{ij} \\ \cdots \\ 5a_{mj} \end{vmatrix} \qquad [3]$$

Dado el significado de P_j, el nivel x_j indica el número de veces que se va a repetir el citado proceso, por lo que en el caso particular de que cada repetición origine una unidad de producto, también representará el número de unidades producidas. Por otra parte, es evidente que *sólo podrá tomar valor positivo o nulo*.

- **Rendimiento de un proceso, c_j.** Es el resultado esperado del mismo cuando se realiza a nivel unidad.
- **Programa de producción.** Plan elaborado por la empresa, consistente en la realización de uno o varios procesos productivos, P_j, a unos niveles determinados. Por ejemplo, para n procesos distintos sería: P_1 a nivel x_1, P_2 a nivel x_2, ..., P_n a nivel x_n.
- **Rendimiento de un programa.** Suma algebraica de los rendimientos obtenidos por los procesos P_j que lo integran, ejecutados a sus respectivos niveles x_j.
- **Matriz tecnológica, $|M_t|$.** Representa al conjunto de procesos productivos posibles, P_j (a un nivel considerado como unidad), los cuales forman las columnas de la matriz. Así pues, cada elemento de M_t, a_{ij}, representa la cantidad de recurso A_i consumida por el proceso P_j a nivel unidad. Para n procesos distintos y m factores productivos, tendremos una matriz de m filas y n columnas:

$$|M_t| = |P_1, P_2, ..., P_n| = \begin{vmatrix} a_{11} & a_{12} & a_{1n} \\ \cdots & \cdots & \cdots \\ a_{21} & a_{22} & a_{2n} \\ \cdots & \cdots & \cdots \\ a_{m1} & a_{m2} & a_{mn} \end{vmatrix} \qquad [4]$$

I.1.1. Planteamiento general

Podemos enunciar el problema de planificación mediante programación lineal como la *obtención de un plan de producción que, sometido a las restricciones a que dan lugar los recursos limitados de la empresa, proporcione un resultado (rendimiento) óptimo*. La resolución de este problema mediante la programación lineal tiene dos características fundamentales:

- Se refiere a un período de tiempo determinado (análisis estático).
- Se suele resolver de acuerdo con un criterio económico, el cual se basará en un conjunto de supuestos técnicos y económicos.

La estructura técnico-económica a tener en cuenta se mantendrá fija durante el período considerado, lo cual sólo es cierto para corto y, a lo sumo, medio plazo. Esta restricción temporal puede ser menos estricta gracias a la aplicación del análisis de sensibilidad de los problemas lineales (ver I.1.2.2).

El **postulado básico de la programación lineal** asume que el rendimiento de un proceso es directamente proporcional al nivel de empleo del mismo. En otras palabras: si mediante un proceso productivo, P_j, empleado a nivel unidad, se obtiene un rendimiento c_j, el empleo de dicho proceso a un nivel x_j veces mayor traerá consigo un rendimiento igual a $c_j x_j$. Esto hace que la expresión del rendimiento, Z, de un programa formado por n procesos, P_j, a nivel x_j, tome la clásica forma lineal mostrada en [5], a la cual se denomina **función objetivo:**

$$Z = c_1x_1 + c_2x_2 + \cdots + c_jx_j + \cdots + c_nx_n \qquad [5]$$

Dado que el consumo, a_{ij}, de un determinado recurso A_i, por parte de un proceso P_j se ha supuesto directamente proporcional a su nivel, x_j (Cuadro I.1), la utilización de dicho recurso en los n procesos integrantes del programa de producción anterior vendría dada por: $a_{i1}x_1 + a_{i2}x_2 + \cdots + a_{in}x_n$. En el caso de

que el recurso en cuestión sea un factor limitado, del que se dispone de una cantidad máxima, A_i, se deberá cumplir:

$$a_{i1}x_1 + a_{i2}x_2 + \cdots + a_{in}x_n \leq A_i \qquad [6]$$

Por último, dado el significado de las incógnitas ($x_j \equiv$ nivel de un proceso), éstas sólo tomarán valores positivos o nulos. De acuerdo con todo lo anterior, nuestro problema consistirá en: *Dados* n *procesos productivos posibles*, P_j, *y* m *factores limitados*, A_i, *encontrar el programa de producción que optimice la expresión* [5] *sometida a las restricciones* [6], *para* $i = 1, ..., m$ *y con* $x_j \geq 0$, es decir:

$$\text{Optimizar } Z = c_1x_1 + \cdots + c_jx_j + \cdots + c_nx_n$$

sometida a:

$$\begin{array}{lr} a_{11}x_1 + \cdots + a_{1j}x_j + \cdots + a_{1n}x_n \leq A_1 & (1) \\ \cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots & \\ a_{i1}x_1 + \cdots + a_{ij}x_j + \cdots + a_{in}x_n \leq A_i & (i) \\ \cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots & \\ a_{m1}x_1 + \cdots + a_{mj}x_j + \cdots + a_{mn}x_n \leq A_m & (m) \\ x_1, ..., x_j, ..., x_n \geq 0 & (m+1) \end{array} \qquad [7]$$

Es conveniente resaltar que la optimización puede hacer referencia a maximizar (por ejemplo: c_j = beneficio) o a minimizar (por ejemplo: c_j = costes) y que, en otros casos, las restricciones pueden ser igualdades o desigualdades de signo mayor o igual. Aunque las hipótesis de linealidad realizadas para la función objetivo a optimizar, Z, y para las distintas restricciones son simplificaciones efectuadas con el objeto de aplicar la programación lineal a la planificación de la producción, los resultados obtenidos de dicha aplicación a ciertos problemas reales es suficientemente satisfactoria como para justificar su inclusión en la presente obra.

Por último, sin entrar en su demostración, enumeramos las características que debe cumplir el **programa óptimo de producción** (J. A. D. Machuca y otros, 1990, página 197):

a) El número de procesos, P_i, que lo integran coincidirá con el de factores limitados o restricciones, aunque en algunos casos (solución degenerada) puede ser menor.
b) Los niveles x_j, de los citados procesos, P_j, deben ser positivos (en la solución degenerada puede haber alguno nulo).
c) Los niveles x_j deben ser tales que se cumplan todas las restricciones.
d) Por último, el programa que, cumpliendo las tres condiciones anteriores, proporcione el máximo valor de Z (si estamos maximizando) o el mínimo (si estamos minimizando) será el programa óptimo.

I.1.2. Métodos de resolución

De entre los distintos métodos de resolución, hemos escogido el **método gráfico** en el plano de los procesos y el **método simplex tabulado**. El primero ayudará a captar y comprender los principales conceptos relacionados con esta técnica; el segundo es el más comúnmente utilizado y el más extendido en los programas de software comercializados. Aunque difieren en la forma de llegar a la solución final, ambos tienen en común las tres primeras **fases que llevan al planteamiento del problema**. Estas son:

- Identificación de las variables o incógnitas del problema a resolver.
- Determinación de la función objetivo a optimizar.
- Establecimiento de las restricciones.

La cuarta fase, resolución del problema, se abordará en el apartado I.1.2.1.

I.1.2.1. *Fase de resolución*

Para ilustrar esta etapa utilizaremos un ejemplo simplificado que facilitará su comprensión, así como la de diversos conceptos importantes que iremos explicando a lo largo del mismo.

EJEMPLO I.1. Aplicación de dos métodos de programación lineal

I.1.A. *Planteamiento del problema*

Una determinada empresa produce y comercializa dos productos, P_1 y P_2, cada uno de ellos integrado por dos componentes, uno de los cuales procede de un taller *A* y el otro de un taller *B*. Ambos talleres pueden fabricar indistintamente los componentes respectivos de ambos productos. Se sabe que para un producto dado, P_i, el número de componentes fabricados en cada uno de los talleres, coincide (es decir, número componentes P_j en A = número componentes P_j en B = número P_i).

La capacidad disponible del taller *A* es tal que, en el caso de dedicarla únicamente a la fabricación de componentes de P_1, se obtendrían los suficientes para dar lugar a 50 unidades de este producto. En el caso opuesto (dedicación exclusiva a los componentes de P_2) se podrían obtener 100 unidades de P_2.

Por otro lado, la capacidad mensual del taller *B* es suficiente para proporcionar, como máximo, el número de componentes necesarios para la obtención de un total de 60 unidades de producto terminado (ya sea únicamente P_1, P_2 o una combinación de ambos).

Por último, los precios de venta unitarios de P_1 y P_2 son, respectivamente, de 42 y 35 u.m., siendo los costes unitarios de los mismos 30 y 25 u.m.

De acuerdo con lo anterior, la gerencia desea conocer:

1. ¿Cuál es el plan de producción que conduciría a un resultado óptimo?
2. ¿En qué condiciones estaría interesada la empresa en dedicar parte de la capacidad de sus talleres para una actividad distinta de la producción de P_1 y P_2?

I.1.A.1. *Identificación de incógnitas*

En primer lugar, se deben identificar las incógnitas del problema que, en el presente caso, son las cantidades a producir de P_1 y P_2, a fin de encontrar el plan óptimo. Llamaremos *X* e *Y* a las citadas cantidades.

I.1.A.2. *Determinación de la función objetivo*

En segundo lugar, se pasa a la determinación de la función objetivo a optimizar, *Z*, que en este caso será la expresión del beneficio producido por un programa de producción genérico (*X*, *Y*). El rendimiento obtenido por cada unidad de producto será igual a la diferencia entre su precio de venta y su coste. Llamando r_i al rendimiento unitario del producto P_i, la función objetivo sería:

$$Z = r_1 X + r_2 Y$$

en el problema que nos ocupa, los valores de r_1 y r_2 son:

$$r_1 = 42 - 30 = 12 \text{ u.m.}$$
$$r_2 = 35 - 25 = 10 \text{ u.m.}$$

con lo que obtenemos:

$$Z = 12X + 12Y$$

I.1.A.3. *Determinación de las restricciones*

Las restricciones a tener en cuenta son las que proceden de la capacidad limitada de los talleres *A* y *B*, además de las que expresan las condiciones de no negatividad de las incógnitas del problema. Para la determinación gráfica de las restricciones vamos a definir, en el espacio de dos dimensiones, unos ejes cuyas ordenadas y abscisas representen, respectivamente, unidades de P_2 y de P_1. De esta forma, cada posible programa de producción estará representado por un punto del primer cuadrante, pues las cantidades a fabricar serán positivas o nulas. Veamos, pues, las restricciones.

Taller *A*. La capacidad del taller *A* es tal que, si se dedicase únicamente al producto P_1, se conseguirían componentes para 50 unidades. En este caso, no se conseguiría ninguna unidad para P_2. Así pues, las coordenadas de ese punto límite serían: $X_1 = 50$, $Y_1 = 0$. Por otra parte, si el taller *A* se dedicase únicamente al producto P_2, se podrían obtener 100 unidades de este producto, frente a cero unidades del P_1. Es decir: $X_2 = 0$, $Y_2 = 100$. En el presente caso, en que existen únicamente dos incógnitas, cada restricción divide al espacio de dos dimensiones en dos semiplanos separados por una recta límite (la restricción en forma de igualdad). Los dos puntos hallados anteriormente forman parte de una de esas rectas, cuya ecuación se podrá deducir a partir de la expresión de la recta que pasa por dos puntos: $(Y_2 - Y_1)/(X_2 - X_1) = (Y - Y_1)/(X - X_1)$. Aplicándola a los puntos deducidos en nuestro problema, tendremos:

$$(0 - 100)/(50 - 0) = (Y - 100)/(X - 0) \Rightarrow$$
$$\Rightarrow 100X + 50Y = 50 \cdot 100 \Rightarrow 2X + Y = 100$$

Como los puntos (0, 100) y (50, 0) proceden de considerar capacidades máximas al taller *A*, el resto de las capacidades permisibles (inferiores a las máximas) darán lugar a puntos (*X*, *Y*) situados por debajo de la recta límite, es decir, que las soluciones posibles estarán en el semiplano $2x + Y \leqslant 100$, inecuación que da lugar a la primera restricción (Figura I.1).

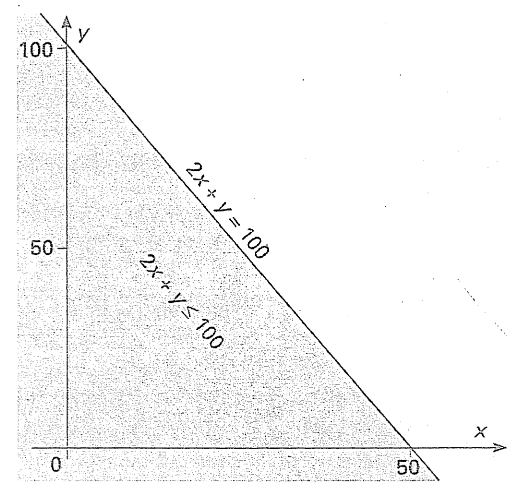


Figura I.1. Representación gráfica de $2X + Y \leqslant 100$.

Taller *B*. Al ser la capacidad del taller *B* suficiente para suministrar componentes para un máximo de 60 unidades de producto terminado, cualquiera que sea el producto final, podremos poner: número total de unidades fabricadas (de la clase que sea) $\leqslant$ 60, y dado que este número total se obtiene sumando las unidades producidas de $P_1(= X)$ con las de $P_2(= Y)$ la expresión anterior se transforma en:

$$X + Y \leqslant 60$$

Si a las restricciones de los talleres *A* y *B* añadimos las de no negatividad ($x_i \geqslant 0$), tendremos el conjunto completo de restricciones para el presente problema, al cual está sujeto la función objetivo a optimizar. De esta forma, el problema a resolver será:

$$\max Z = 12X + 10Y$$

sometido a:

$$2X + Y \leqslant 100 \quad (a)$$
$$X + Y \leqslant 60 \quad (b)$$
$$X, Y \geqslant 0 \quad (c)$$

I.1.B. Resolución gráfica en el plano de los procesos productivos

I.1.B.1. *Delimitación de la zona de soluciones factibles*

Las soluciones posibles del problema estarán, pues, sujetas a las restricciones indicadas en el apartado anterior, por lo que, considerando el espacio de dos dimensiones mencionado (*X*, *Y*), estarán situadas en el primer cuadrante (por ser $X \geqslant 0$ e $Y \geqslant 0$) y, simultáneamente, dentro de los semiplanos representados por las restricciones (*a*) y (*b*). La zona de soluciones posibles se muestra en la Figura I.2 (*OABC*).

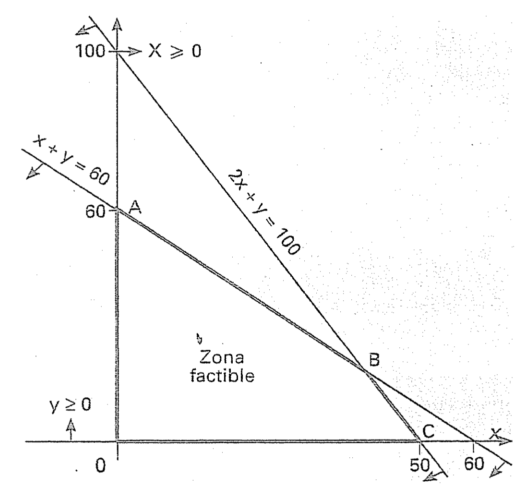


Figura I.2. Zona de soluciones factibles.

I.1.B.2. *Determinación gráfica del óptimo*

Dentro de la superficie *OABC* habrá que buscar cuál es el punto que, en nuestro caso, **maximiza la función objetivo** $Z = 12X + 10Y$, la cual representa un haz de

rectas paralelas que varían con el valor de Z. Para $Z = 0$, tendremos una recta que pasa por el origen de coordenadas (Figura I.3). Dado que al aumentar Z nos alejaremos del origen y que, en nuestro caso, estamos maximizando, la solución del problema será aquel punto de $OABC$ (siempre un vértice) que, formando parte de una recta del haz $Z = 12X + 10Y$, esté lo más alejado posible del origen. Así pues, trazaremos una recta cualquiera del haz Z (por ejemplo: la correspondiente a $Z = 120 \Rightarrow 120 = 12X + 10Y$) y, a partir de ésta, trazaremos paralelas alejándonos del origen hasta que lleguemos al punto límite de la Figura $OABC$ (ver Figura I.3.).

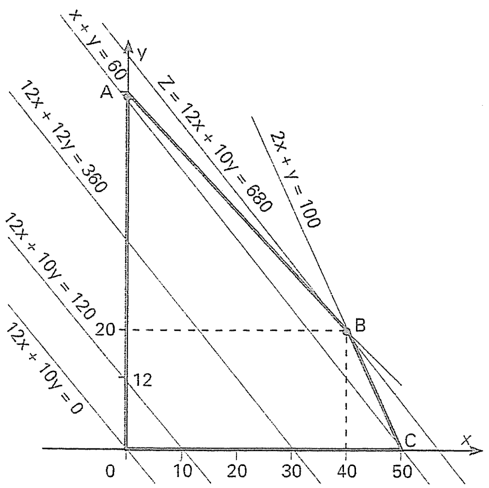


Figura I.3. Determinación gráfica del punto óptimo.

Como se desprende de la Figura I.3, el punto B, intersección de las dos rectas límites, es la solución óptima del problema. Los valores correspondientes de X e Y se obtienen resolviendo el sistema de ecuaciones formado por las rectas:

$$\left.\begin{array}{l} 2X + Y = 100 \\ X + Y = 60 \end{array}\right] \Rightarrow \begin{array}{l} 2X + (60 - X) = 100 \Rightarrow X = 40 \\ 40 + Y = 60 \Rightarrow Y = 20 \end{array}$$

Así pues, el **plan óptimo de producción** implicará fabricar 40 unidades del producto P_1 y 20 del producto P_2, lo que producirá un **rendimiento**:

$$Z = 12X + 10Y = 12 \cdot 40 + 10 \cdot 20 = 680 \text{ u.m.}$$

I.1.C. Resolución por el método símplex tabulado

I.1.C.1. *Transformación de las restricciones en un sistema de ecuaciones*

Para la resolución de los problemas de programación lineal por el método símplex, es necesario que las *inecuaciones representativas de las restricciones* sean *transformadas*, previamente, en *ecuaciones*. En conjunto formarán un sistema de ecuaciones cuyas posibles soluciones, en nuestro caso, serán los puntos encerrados en la zona factible $OABC$ de la Figura I.2. Por ser las inecuaciones de nuestro problema del tipo $\leqslant$, introduciremos en el primer miembro de cada una de ellas un sumando positivo, que denominaremos **variable de holgura, h_i**. De esta forma:

$$\begin{aligned} 2X + Y + h_1 &= 100 \\ X + Y + h_2 &= 60 \\ X, Y, h_1, h_2 &\geqslant 0 \end{aligned}$$

En el contexto planteado, cuando un programa concreto (X, Y) cumpla las restricciones en forma de desigualdad, estará consumiendo una cantidad de recursos inferior a la capacidad de los talleres (100 y 60, respectivamente). En ese caso, *las variables de holgura* tomarán valores positivos y *representarán* la parte de capacidad no utilizada, es decir, los *recursos ociosos*. Evidentemente, éstos implican un coste y, consecuentemente, los rendimientos de las variables h_i en nuestro problema deberían ser negativos. A pesar de ello y de que el método símplex permitiría adoptar dicha realidad, asumiremos aquí una simplificación generalizada en dicho método, que implica **asignarles rendimiento nulo**. Por tanto, la función objetivo quedaría:

$$\max Z = 12X + 10Y + 0 \cdot h_1 + 0 \cdot h_2$$

I.1.C.2. *Determinación de un programa base inicial y del rendimiento, Z, que produce*

El desarrollo del método símplex tabulado comienza buscando una solución o programa inicial al que se denomina **programa base**, el cual debe cumplir las tres primeras condiciones exigidas al programa óptimo (ver I.1.1). Debido a ello, sólo estará formado por dos variables, cuyos vectores proceso (ver Cuadro I.1) se emplearán a un nivel tal que se cumplan las restricciones como igualdad; por tanto, el resto de las variables tomará valor 0. Por otra parte, debido al método de cálculo, dichos vectores deben formar una matriz unitaria. Esto quiere decir que los elementos de su diagonal principal deben ser igual a 1 y el resto iguales a cero. En nuestro problema, dicha condición es cumplida únicamente por el programa formado por h_1 y h_2 pues, al aparecer sólo en una ecuación y con coeficiente unitario, sus respectivos vectores son:

$$h_1 = \begin{vmatrix} 1 \\ 0 \end{vmatrix}, \qquad h_2 = \begin{vmatrix} 0 \\ 1 \end{vmatrix}$$

Al ser h_1 y h_2 las variables elegidas y, dado que las restantes tomarán valor nulo, la solución de partido implicará no producir nada, es decir:

$$h_1 = 100, \quad h_2 = 60, \quad X = 0, \quad Y = 0$$

por lo que:

$$Z = 12 \times 0 + 10 \times 0 + 0 \times 100 + 0 \times 60 = 0$$

I.1.C.3. *Elaboración de la primera tabla*

La Tabla I.1 será el punto de partida para la resolución del problema y se obtiene de la siguiente forma:

- Columna (1): Está constituida por los rendimientos directos c_i, del programa base elegido.
- Columna (2): Indica cuáles son los procesos, P_i, integrantes del programa base.
- Columna (3): Indica los niveles x_i de los procesos P_j, que, como vimos en I.1.C.2, coinciden con los términos independientes de las restricciones debido a que los distintos P_i son vectores unitarios y sólo hay uno por ecuación.
- Fila (1): Rendimientos directos c_j de todos los procesos existentes.
- Fila (2): Distintos vectores proceso.
- Fila (3): Rendimientos indirectos z_j de los distintos vectores proceso.
- Fila (4): Rendimientos marginales w_j de los vectores proceso.

Cada columna de la parte central de la tabla está formada por los coeficientes de las distintas variables/procesos en las ecuaciones de restricción en forma de igualdad. Puede observarse cómo las correspondientes al programa base elegido (h_1 y h_2) forma una matriz unitaria. En cuanto a las filas (3) y (4), explicamos a continuación su respectivo significado y forma de cálculo.

A partir de la solución inicial, deberemos intentar mejorar para acercarnos al óptimo. Observemos qué ocurriría si, en el programa actual, introdujésemos a nivel unidad (ver Cuadro I.1) alguna de las variables excluidas del mismo. Si probamos con P_1, sería necesario dedicar a su proceso dos unidades de recursos del

Tabla I.1. Cuadro inicial para el programa base

			12	(10)	0	0	$c_j(1)$
(1) c_i	(2) P_i	(3) x_i	P_1	P_2	h_1	h_2	$P_j(2)$
(0)	h_1	100	×(2)	1	1	0	
(0)	h_2	60	×(1)+	1	0	1	
			+(0)=	−(0)+	0	0	$z_j(3)$
			12	(10)=	0	0	$w_j(4)$

taller A y una del taller B; ello produciría un **rendimiento directo de 12 u.m. (= c_1)**. Ahora bien, para que ello sea posible, tendríamos que detraer dichos recursos de los adscritos al actual programa (h_1 y h_2), que ahora absorbe la totalidad de los mismos. Con ello, la función objetivo se decrementaría en una cantidad igual a la que se obtiene utilizando los recursos mencionados (dos un. taller A y una un. taller B) para las variables del programa base. Para llegar a dicha cantidad de recursos habría que emplear h_1 a nivel 2 y h_2 a nivel 1, pues:

$$2 \times h_1 + 1 \times h_2 = 2 \times \begin{vmatrix} 1 \\ 0 \end{vmatrix} + 1 \times \begin{vmatrix} 0 \\ 1 \end{vmatrix} = \begin{vmatrix} 2 \\ 0 \end{vmatrix} + \begin{vmatrix} 0 \\ 1 \end{vmatrix} = \begin{vmatrix} 2 \\ 1 \end{vmatrix}$$

por lo que la **disminución en el rendimiento total, Z, sería:**

$$z_1 = 2c_{h1} + 1c_{h2} = 2 \times 0 + 1 \times 0 = 0$$

A dicho rendimiento, z_1, se le denomina **rendimiento indirecto de P_1** y, como dijimos, es el que se obtiene al aplicar al programa base una cantidad de recursos igual a la necesaria para que P_1 se desarrolle a nivel unidad. De esta forma, la introducción de P_1 a nivel unidad implicaría una variación en la función objetivo, igual a:

$$w_1 = c_1 - z_1 = 12 - 0 = 12$$

Dicha diferencia se denomina **rendimiento marginal de P_1**, el cual representa la *variación de rendimiento en la función objetivo Z cuando se introduce dicho proceso a nivel unidad*. Si, como en este caso, estamos maximizando, será conveniente introducir P_1 en la solución cuando $w_1 > 0$, pero nunca en caso contrario. **Tenemos así un indicador para mejorar el programa base inicial.**

Del mismo modo se calculan los correspondientes rendimientos de P_2, cuyo vector proceso a nivel unidad es

$$P_2 = \begin{vmatrix} 1 \\ 1 \end{vmatrix} \Rightarrow 1h_1 + 1h_2 = 1 \times \begin{vmatrix} 1 \\ 0 \end{vmatrix} + 1 \times \begin{vmatrix} 0 \\ 1 \end{vmatrix} = \begin{vmatrix} 1 \\ 1 \end{vmatrix} \Rightarrow$$

$$\Rightarrow z_2 = 1 \times 0 + 1 \times 0 = 0 \Rightarrow w_2 = c_2 - z_2 = 10 - 0 = 10$$

Es evidente que el z_i de las variables del programa base también es cero, por lo que sus respectivos rendimientos marginales serán nulos. De esta forma, se generan las filas (3) y (4) de la Tabla I.1, correspondientes, respectivamente, a los rendimientos indirectos y marginales de las distintas variables del problema. Hay que hacer notar que, con el desarrollo anterior, hemos pretendido que se comprenda conceptualmente la mecánica de cálculo utilizada en el método símplex. En la práctica, dicha mecánica es mucho más fácil, pues, para hallar los distintos z_j hasta multiplicar la columna (1) por la correspondiente a la variable P_j en la parte central del cuadro (ver Tabla I.1). Por lo que respecta al cálculo de w_j, sólo hay que restar los correspondientes valores de c_j y z_j (filas (1) y (3) en la Tabla I.1).

I.1.C.4. *Determinación de las variables entrante y saliente*

A partir de lo expuesto en I.1.C.3, resulta obvio que será conveniente *introducir en el programa* cualquiera de las variables con rendimiento marginal, w_j, positivo. De entre las distintas posibilidades, es norma elegir *aquella con mayor valor de* w_j, en nuestro caso P_1, cuya columna se ha resaltado en la Tabla I.2.

Tabla I.2. Procesos entrante y saliente

(1) c_i	(2) P_i	(3) x_i	P_1	P_2	h_1	h_2	$P_j(2)$
			12	10	0	0	$c_j(1)$
0	h_1	(100) ⊙	(2)	1	1	0	$x_1' = 50$
0	h_2	(60) ⊙	[1]	1	0	1	$x_1' = 60$
			0	0	0	0	$z_j(3)$
			12	10	0	0	$w_j(4)$

A continuación, y dado que el *número de variables* en el programa debe ser *igual al de restricciones*, será necesario *eliminar una de las existentes en la solución básica*. Es obvio que interesa introducir P_1 al nivel más elevado posible; al hacerlo a nivel unidad se le adjudicaban 2 unidades del taller A y 1 unidad del taller B; si lo hiciésemos a nivel 2, se consumirían 4 y 2 unidades, respectivamente, etc. En general, si denominamos x_1' al nivel con que entrará P_1 en el programa, los recursos consumidos por el correspondiente proceso serán $2x_1'$ y $1x_1'$. Si llamamos x_{h1} y x_{h2} a los niveles actuales de h_1 y h_2, y x_{h1}' y x_{h2}' a los que tendrán una vez introducido P_1, podremos poner:

$$x_{h1}' = x_{h1} - 2x_1' \qquad x_{h2}' = x_{h2} - x_1'$$

A continuación, haremos igual a cero las expresiones anteriores y deduciremos, de cada una de ellas, un valor para x_1'. Ahora bien, dado que sólo uno de los nuevos niveles x_{h1}' y x_{h2}', debe ser nulo para que se sigan cumpliendo las tres primeras condiciones exigidas al programa óptimo (ver I.1.1), escogeremos como nivel de entrada de P_1 el menor positivo de los hallados, el cual anulará el nivel de una de las variables del primitivo programa base, dejando positivo el de la segunda. En nuestro caso:

$$\left.\begin{array}{l} x_{h1}' = 0 = 100 - 2x_1' \Rightarrow x_1' = 50 \\ x_{h2}' = 0 = 60 - x_1' \Rightarrow x_1' = 60 \end{array}\right] \Rightarrow x_1' = 50,\ x_{h2}' = 10 \text{ y } x_{h1}' = 0$$

Sale por tanto del programa *la variable* h_1, cuya fila se ha resaltado en la Tabla I.2. Los valores x_1', comentados anteriormente, se calculan fácilmente dividiendo la columna (3), x_i, por la correspondiente a P_1 (ver Tabla I.2).

I.1.C.5. *Cálculo de una nueva tabla*

Dado que las variables del programa solución deben proporcionar una matriz unitaria, deberemos transformar los coeficientes (2,1) del proceso entrante en los (1,0) del saliente. De esa forma, mantendremos la matriz en cuestión. Para conseguirlo realizaremos los siguientes pasos:

1. *Obtención de la fila del proceso entrante en el programa base* (Tabla I.3). Dividiremos la fila correspondiente al proceso saliente por el **elemento pivote,** 2, que es el cruce de la fila y columna resaltadas en la Tabla I.2. De esta forma hemos conseguido que el primer componente de P_1 se transforme en un 1 sin que para ello haya cambiado la restricción del problema. Se obtiene así la fila correspondiente de la Tabla I.3.

Tabla I.3. Cálculo de la fila del proceso entrante

Fila del proceso saliente, h_1 en la Tabla I.2				
100	2	1	1	0
↓ : 2 **(elemento pivote)**				
50	1	1/2	1/2	0
Fila del proceso entrante, P_1 en la Tabla I.5				

2. *Transformación de las filas correspondientes a las variables que permanecen en el programa base (Tabla I.4).* Se multiplica la fila obtenida en el apar-

Tabla I.4. Cálculo de nueva fila del proceso no saliente

Fila de P_1 en la Tabla I.5					
50	1	1/2	1/2	0	
↓ × 1 **(elemento semipivote)**					
50	1	1/2	1/2	0	→ ⊖
Fila de h_2 en la Tabla I.3					
60	1	1	0	1	→ ⊕
Fila de h_2 en la Tabla I.5					
10	0	1/2	−1/2	1	← ⊜

tado anterior por el elemento semipivote correspondiente a la intersección de la columna del vector entrante con la fila de h_2. La fila resultante se resta de la correspondiente al semipivote elegido.

Con esta operación hemos transformado en un 0 el segundo componente de P_1. La fila resultante es la que corresponde a h_2 en la nueva tabla. Se repetirá esta operación para el resto de los semipivotes existentes. En nuestro problema particular no existen más, con lo que hemos acabado el proceso. La nueva tabla sería la I.5, donde las filas de z_j y w_j se han calculado como indicamos en I.1.C.3.

Tabla I.5. Segundo cuadro

	c_i	P_i	x_i	P_1	P_2	h_1	h_2	P_j
				12	10	0	0	c_j
	12	P_1	50	1	[1/2]	1/2	0	$x_2' = 100$
Vector ← saliente	0	h_2	10	0	(1/2)	−1/2	1	$x_2' = 20$
				12	6	6	0	z_j
				0	4	−6	0	w_j
					↑ *Vector entrante*			

I.1.C.6. *Cálculo de la solución óptima*

A partir de ahora se sigue operando iterativamente, de forma análoga a la mostrada, hasta llegar a un cuadro en el que todos los rendimientos marginales sean negativos o nulos. Eso querrá decir que ningún cambio en el programa base producirá mejora en la función objetivo que deseamos maximizar. La siguiente Tabla será la I.6, la cual, por cumplir el requisito mencionado, proporciona la solución óptima.

Tabla I.6. Solución óptima

c_i	P_i	x_i	P_1	P_2	h_1	h_2	P_j
			12	10	0	0	c_j
12	(P_1	40)	1	0	1	−1	
10	(P_2	20)	0	1	−1	2	
			12	10	2	8	z_j
			0	0	−2	−8	w_j

Así pues, el **programa óptimo,** que cumple ya las cuatro condiciones indicadas en I.1.1, consistirá en fabricar 40 unidades de P_1 y 20 unidades de P_2, resultando que coincide, lógicamente, con el de la solución gráfica.

$$Z = 12X + 10Y = 12 \cdot 40 + 10 \cdot 20 = 680 \text{ u.m.}$$

Estos valores de X e Y hacen que las holguras h_1 y h_2 se anulen, lo que indica que las capacidades de los talleres A y B son utilizadas al máximo (téngase en cuenta que toda variable que no aparece en un determinado cuadro toma valor nulo y, por tanto, $h_1 = h_2 = 0$ en el óptimo).

I.1.C.7. *Condiciones admisibles para dedicar los talleres a una actividad distinta de la producción de P_1 y P_2*

Por una parte, sabemos que, en nuestro caso, el rendimiento marginal de un determinado vector proceso simboliza el incremento de beneficio que se produciría al introducir en el programa de producción una unidad del mismo. Por otra parte, si dedicamos parte de los recursos de los talleres T_1 o/y T_2 a una actividad distinta de la fabricación de P_1 y P_2, implicará que las respectivas holguras h_1 o/y h_2 tomarán valores positivos, o lo que es lo mismo, formarán parte del programa final. Por lo dicho anteriormente, cada unidad introducida de h_i dará lugar a una variación del beneficio total igual a su rendimiento marginal. Por tanto:

$$\Delta h_1 = 1 \Rightarrow Z'' \text{ (nuevo beneficio)} = Z + w_{h1} = \\ = 680 + (-2) = 678 \text{ u.m.}$$

Como vemos, el beneficio disminuye en 2 u.m., por lo que esta acción sólo tendrá sentido cuando esa unidad de recurso que se retira de la producción actual se dedique a una labor que genere un beneficio mayor que 2 u.m. por cada unidad de recurso T_1 sustraída al programa primitivo.

Análogamente:

$$\Delta h_2 = 1 \Rightarrow Z'' = Z + w_{h2} = 680 + (-8) = 672$$

lo cual implica que la nueva actividad debería generar un beneficio mayor que 8 u.m. por cada unidad que se tomara del taller T_2.

I.1.2.2. *Otros aspectos de interés en el método símplex tabulado*

En el apartado anterior vimos una serie de conceptos y técnicas, los cuales fueron expuestos sobre un caso de maximización de la función objetivo. En el presente epígrafe comentaremos brevemente otros aspectos de interés no contemplados previamente.

° *Caso de minimización*

El procedimiento a emplear es en todo análogo al que vimos en I.1.2.1, excepto en una cuestión: *en el método gráfico*, la solución óptima se hallará, lógicamente, en la intersección de la línea que encierra las soluciones factibles con la recta del haz Z que se encuentre lo más cerca posible del origen, pues es ésta la que implicaría un menor valor de Z. En el *método símplex* habrá que introducir aquellas variables con rendimiento marginal negativo, pues tratamos de minimizar la función objetivo. La solución óptima se obtiene cuando se llega a una tabla en la que los rendimientos marginales que aparecen en la última fila son positivos o nulos.

° *Formación del programa base inicial*

Al desarrollar el método símplex tabulado hemos podido observar que es necesario partir de un programa base que proporcione una matriz unitaria. Esta debe estar formada por variables que aparezcan en una única ecuación y que tengan coeficiente uno. En el caso contemplado en I.1.2.1 con restricciones de tipo $\leqslant$, dicho programa estaba formado por las variables de holgura. Sin embargo, en el caso más general, podemos encontrarnos con restricciones $\geqslant$, en las que las correspondientes h_i tendrían signo menos y, por tanto, no serían utilizables en la solución inicial. Tampoco se podría hacer uso de dichas variables en ecuaciones que, desde el principio, estén formuladas como igualdad. Teniendo en cuenta estas posibilidades, el procedimiento general para formar el programa base inicial implica utilizar:

a) Aquellas variables de holgura h_j, cuyo signo sea el mismo que el del término independiente, A_j, de la ecuación respectiva. Este será el caso de desigualdades $\leqslant$ con término independiente positivo y de desigualdades $\geqslant$ con término independiente negativo. En este último caso se multiplicaría toda la ecuación por -1, lo que transformaría en positivos a h_j y a A_j.

b) Aquellas variables, x_j, que aparezcan en una sola ecuación y cuyo coeficiente tenga el mismo signo que el término independiente, A_j. Si el coeficiente de x_j es 1, tenemos directamente el vector unitario requerido; si es $a_{ij} > 1$, se transformará en 1 dividiendo toda su ecuación por a_{ij}.

c) Si con las anteriores variables no hemos obtenido suficientes vectores proceso unitarios, se introducirán en aquellas ecuaciones i que carezcan de ellos, una variable artificial, k_i, de coeficiente 1 y del mismo signo que el término independiente. Dado que estas variables se incluyen únicamente para facilitar la obtención de un programa base unitario, y que carecen de sentido económico, hay que asegurarse de que no aparecerán en el programa óptimo. Para ello, se les asigna un rendimiento $-M$ (si estamos maximizando) o $+M$ (en caso de minimizar), siendo M un número tan

grande como se quiera. De esta manera, la función objetivo, Z, en el caso de maximización tomará la forma genérica:

$$\max Z = \sum_{j=1}^{n} c_j x_j + \sum_{s=1}^{r} 0 \cdot h_s + \sum_{i=1}^{t} (-M)\, k_i$$

siendo n: número de procesos P_j;
r: número de variables de holgura existentes;
t: número de variables artificiales introducidas.

Para ilustrar el caso más general puede verse el siguiente ejemplo:

$$\min Z = 3x_1 + 4x_2 + 2x_3 \qquad \min Z = 3x_1 + 4x_2 + 2x_3 + 0h_1 + 0h_2 + 0h_3 + Mk_2$$

$$\left.\begin{aligned} x_1 - 2x_2 &\leqslant 10 \\ x_1 + x_2 &\geqslant 20 \\ x_3 &\geqslant 25 \\ x_j &\geqslant 0 \end{aligned}\right\} \Rightarrow \quad \begin{aligned} x_1 - 2x_2 + h_1 &= 10 \\ x_1 + x_2 - h_2 + k_2 &= 20 \\ x_3 - h_3 &= 25 \\ x_j &\geqslant 0 \end{aligned}$$

El programa base estará formado por h_1, k_2 y x_3.

° *Soluciones alternativas y degeneradas*

Cuando alguna variable excluida de la solución tiene un rendimiento marginal nulo, ésta puede introducirse en el programa sin que cambie el valor de la función objetivo, Z. Dicha **solución** se denomina **alternativa**.

Puede ocurrir que alguna de las variables incluidas en el programa óptimo tome valor nulo. En dicho caso, el número de variables a nivel positivo es inferior al de restricciones, no cumpliéndose una de las características exigidas al óptimo. Cuando esto ocurre tenemos una **solución degenerada**.

° *Precios sombra o costes de referencia*[2]

Como se vio en el apartado I.1.C.7, los rendimientos marginales, w_j, que aparecen en la tabla correspondiente a la solución óptima, son elementos de gran interés para la empresa. Centrándonos en las variables de holgura h_j y en un caso de maximización (ingresos o beneficios), los correspondientes w_j, cambiados de signo, denominados **precios sombra** o **costes de referencia** constituyen un marco informativo importante sobre los costes de los recursos limitados (con $h_j \geqslant 0$). Así, en el **caso de una función objetivo ingresos**, y dado el significado de los rendimientos marginales (ver Apartado I.1.C.3), los precios sombra indicarían el coste máximo que la empresa estaría dispuesta a asumir para ampliar en una unidad el recurso limitado correspondiente. Dicho coste sería positivo únicamente en el caso de que el recurso en cuestión estuviera saturado, pues sólo en dicha circunstancia la correspondiente variable de holgura sería nula (estaría excluida de la solución óptima y tendría un $w_j < 0$). Si h_j formara parte de la solución, su w_j (y consecuentemente, su precio sombra) sería nulo y no interesaría incrementar

[2] Para un estudio más exhaustivo de este tema, relacionado con la Dualidad en Programación Lineal, puede verse J. A. D. Machuca y otros (1990, Capítulo 7) y J. A. D. Machuca y R. Ruiz (1982).

el recurso limitado con ella relacionado, lo cual es lógico, pues al ser $h_j > 0$ indica ociosidad en el mismo.

Si se hubiese pretendido maximizar beneficios, el precio sombra de la holgura h_j representaría el beneficio que se conseguiría al aumentar en una unidad el recurso a ella asociado. Por tanto, también indicaría el diferencial máximo que el coste de la nueva unidad podría tener sobre el de las primitivas; si se llegase a ese límite, el beneficio producido por la incorporación de la nueva unidad sería nulo.

° *Análisis de sensibilidad*[3]

Para alcanzar el óptimo de un determinado programa lineal, es necesario que las condiciones reales (coeficientes de la función objetivo, componentes de la matriz tecnológica, etc.) coincidan con las supuestas en la resolución del problema en cuestión o, al menos, que varíen dentro de unos límites que no provoquen un cambio del programa óptimo. Sin embargo, frecuentemente los datos empleados no son demasiado precisos y, por tanto, puede haber divergencias entre los valores reales y los utilizados. Es más, aunque dichas divergencias fuesen insignificantes en un principio, pueden tener lugar alteraciones posteriores a la resolución del problema, con lo que el óptimo obtenido puede dejar de serlo. Debido a las circunstancias mencionadas, puede ser conveniente realizar un análisis sobre la solución óptima de las posibles variaciones en los datos. Los comentarios realizados sobre los precios sombra constituyen en realidad una primera aproximación al análisis de sensibilidad, aunque éste se redujo a un nivel de variaciones unitarias. Para ampliar dicho ámbito, aunque de forma resumida, contemplaremos una serie de casos tipos:

a) **Variaciones en los coeficientes de la función objetivo, Z.** En el caso de que se produjese una variación en algún coeficiente, c_j, de Z, de forma que uno o más rendimientos marginales de variables no incluidas en la solución óptma cambiarán de signo (a positivo si se maximiza o a negativo si se minimiza), éstas podrían pasar a formar parte de una nueva solución óptima distinta de la primitiva. En dicho caso, habría que proceder a una postoptimización a partir de la tabla que proporcionaba el óptimo en el problema primitivo, en la cual habría que sustituir c_j por su nuevo valor y transformar los correspondientes valores de rendimientos indirectos o/y marginales que hubieran cambiado con c_i. A partir de esta nueva situación se continuaría iterando hasta llegar a la nueva solución óptima.

b) **Variación en los términos independientes, A_i, de las restricciones.** Si se produjesen alteraciones en algún A_i y ello provocase que alguna(s) de las variables incluidas en la solución óptima pasase(n) a tener un nivel $x_i < 0$, aquélla dejaría de ser admisible. Así, para que no cambiase el programa óptimo, el límite máximo de variación de un cierto recurso, A_i, supuestos constantes todos los demás, sería aquel incremento o decremento que llegase a anular alguno de los niveles de los procesos incluidos en la solución actual. Si la variación en A_i superase dicho límite, será necesario postoptimizar; ahora bien, dado que la variación de A_i daría lugar a algún (o algunos) $X_i < 0$, no podríamos encontrar la nueva solución óptima utilizando el método símplex a partir de la última tabla modificada. Por ello, si no se quisiera comenzar de nuevo, se podría utilizar el método símplex dual[4] de Lenke, en el cual sí es admisible la nueva situación.

c) **Variaciones en los coeficientes de las variables x_i, en las ecuaciones de restricción.** Si la variable en cuestión no pertenece al óptimo, cualquier cambio en sus coeficientes que no haga cambiar de signo su rendimiento marginal, no alterará la solución óptima. Si, por el contrario, las variaciones están relacionadas con procesos actualmente en el óptimo, para que éste no varíe deberá cumplirse que los niveles de los procesos del óptimo sigan siendo positivos o, a lo sumo, nulos y que los w_j de las variables excluidas de la solución no cambien de signo.

[3] Para un análisis más exhaustivo, puede verse J. A. D. Machuca y otros (1990, Capítulo 7).

I.2. LOS PROBLEMAS DE TRANSPORTE O DISTRIBUCION[5]

Los problemas que tradicionalmente vienen llamándose de distribución o de transporte[6] responden, en general, a la siguiente estructura. Dados:

- Unas ciertas disponibilidades, d_i, en distintos puntos de origen i ($i = 1, ..., m$).
- Unas necesidades, b_j, en diferentes puntos de destino, j ($j = 1, ..., n$).
- Unos costes de transporte, c_{ij}, entre cada origen i y cada destino j.

determinar cuál es el plan de distribución que consigue satisfacer las necesidades con el mínimo coste total de transporte.

I.2.1. Planteamiento

Si llamamos x_{ij} a la cantidad a transportar desde i hasta j, la formulación general del problema sería:

$$\min Z = \sum_{i=1}^{m} \sum_{j=1}^{n} c_{ij} x_{ij}$$

sujeto a:

$$\sum_{i=1}^{n} x_{ij} \leqslant d_i, \text{ para } i = 1, 2, ..., m$$

$$\sum_{i=1}^{m} x_{ij} = b_j, \text{ para } j = 1, 2, ..., n$$

$$x_{ij} \geqslant 0$$

Aunque, generalmente los puntos de origen suelen ser asimilados a fábricas y los de destino a centros de consumo, las posibilidades de aplicación son bastante más amplias (vea Capítulos 3 y 9). Asimismo, no siempre los problemas de transporte son de minimización, sino que los coeficientes c_{ij} pueden representar rendimientos, ingresos, beneficios, etc., lo que transformaría a Z en una función objetivo a maximizar.

[4] Ver J. Larrañeta (1977).
[5] El presente apartado es un resumen de J. A. D. Machuca y otros (1990, Capítulo 16).
[6] Formulado por F. L. Hitchcock: «The distribution of a product from several sources to numerous localities». *Journal of Mathematics and Physics*, 20, 1941.

De la formulación analítica precedente puede deducirse que este tipo de problemas no es más que un caso particular de la programación lineal, en el cual los coeficientes de las distintas variables son siempre nulos o iguales a la unidad. Existen diversas técnicas para el cálculo del programa base inicial y para la resolución del problema. Dichas técnicas parten de una tabla de doble entrada análoga a la I.7 y suponen que la suma de disponibilidades, D_T, es igual a la de necesidades, N_T: $D_T = \sum_1^m d_i = \sum_1^n b_j = N_T$. Esta condición hace que una de las $(m + n)$ ecuaciones de restricción sea combinación lineal del resto, por lo que sólo existen $(m + n - 1)$ ecuaciones independientes. Debido a ello, la solución básica inicial, así como las sucesivas se comprondrán, como máximo, de un número de variables no nulas igual a $(m + n - 1)$.

Tabla I.7. Tabla característica de los problemas de transporte.

Origen, i \ Destino, j	1	2	...	$n-1$	n	Disponibilidades, d_i
1	c_{11} x_{11}	c_{12} x_{12}	...	$c_{1,n-1}$ $x_{1,n-1}$	c_{1n} x_{1n}	d_1
2	c_{21} x_{21}	c_{22} x_{22}	...	$c_{2,n-1}$ $x_{2,n-1}$	c_{2n} x_{2n}	d_2
⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮
$m-1$	$c_{m-1,1}$ $x_{m-1,1}$	$c_{m-1,2}$ $x_{m-1,2}$	...	$c_{m-1,n-1}$ $N_{m-1,n-1}$	$c_{m-1,n}$ $x_{m-1,n}$	d_{m-1}
m	$c_{m,1}$ x_{m1}	$c_{m,2}$ x_{m2}	...	$c_{m,n-1}$ $x_{m,n-1}$	c_{mn} x_{mn}	d_m
Necesidades, b_j	b_1	b_2	...	b_{n-1}	b_2	$\sum_1^n b_j$ \ $\sum_1^n d_i$

Si en el caso real $D_T \neq N_T$, debe adaptarse el planteamiento. Así , cuando $D_T > N_T$, se introduce un destino ficticio, DF, cuyo consumo, b_F, absorbe la diferencia existente, es decir, $D_T = b_F + N_T$. De forma análoga, cuando $N_T > D_T$ se emplea un origen ficticio OF, que da lugar a unas disponibilidades, d_F, tales que $N_T = d_F + D_T$. En realidad, lo anterior equivale a la introducción de variables de holgura. Por ello, no es extraño que a las casillas ficticias correspondientes se les asigne un rendimiento nulo, tal como se hacía en la resolución de problemas lineales con el método símplex (ver Apartado I.1.C.1).

El diagrama de la Figura I.4 ilustra el proceso a seguir en la modelización de un problema de las características descritas anteriormente.

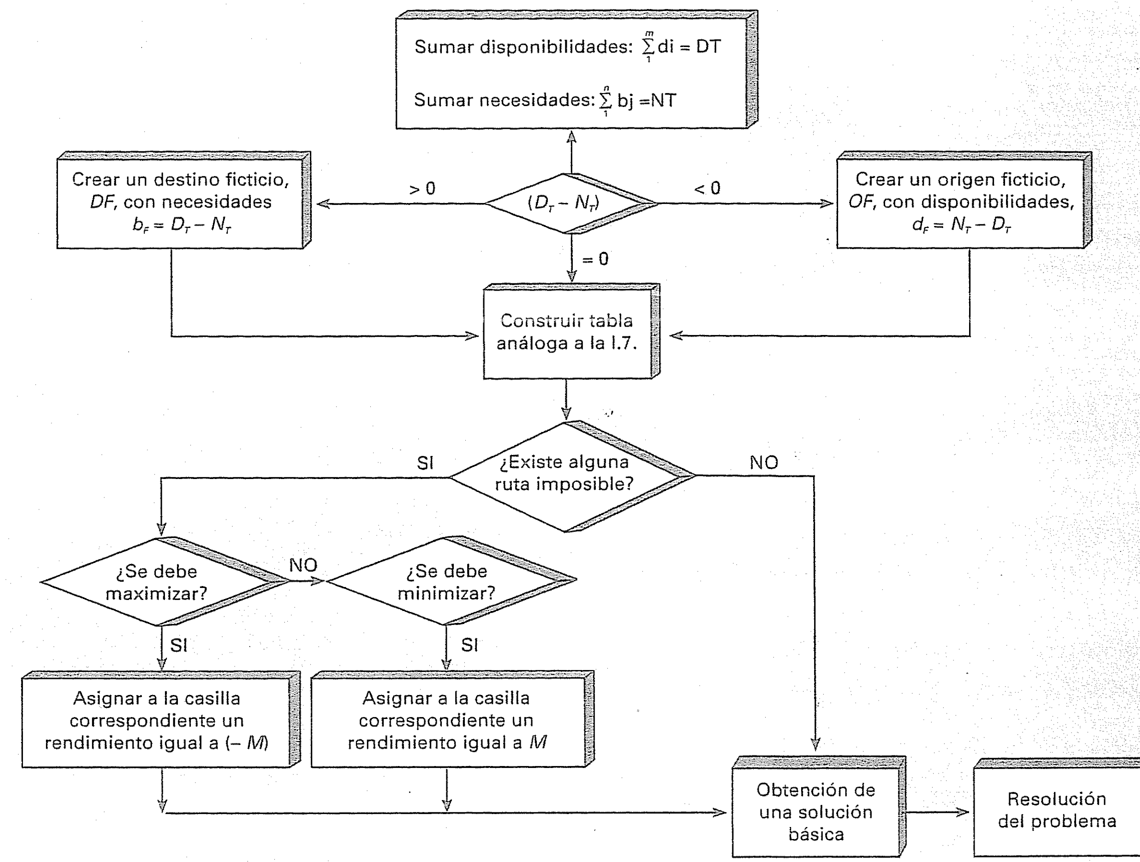


Figura I.4. Obtención de una solución básica.

EJEMPLO I.2. Caso típico de un problema de distribución

Una empresa dispone de tres factorías, F_1, F_2 y F_3, cuyas respectivas producciones mensuales ascienden a 10.000, 15.000 y 20.000 unidades, las cuales se distribuyen a tres almacenes, A_1, A_2 y A_3, donde permanecen hasta que llega la producción del mes siguiente. Debido a que las distancias existentes entre cada origen F_i y cada destino A_j, varían con ellos, los costes de transporte por unidad de producto son también diferentes; éstos se indican en la Tabla I.8. Sabiendo que los almacenes mencionados deben albergar un stock de unidades suficiente para satisfacer una demanda mensual de 7.500, 12.500 y 25.000 unidades, respectivamente, se desea co-

Tabla I.8. Matriz de costes

Orígenes, F_i \ Destinos, A_j	A_1	A_2	A_3
F_1	4	3	1
F_2	1	3	2
F_3	4	2	1

nocer el programa óptimo de distribución que minimiza los costes totales de transporte.

Aunque existen diversas técnicas para determinar el programa base inicial y para resolver el problema, describiremos aquí las dos más conocidas. Para conocer otras técnicas puede verse J. A. D. Machuca y otros (1990, Capítulo 16).

I.2.A. Planteamiento analítico

Si representamos por x_{ij} el número de unidades a transportar desde F_i a A_j, obtendremos la siguiente estructura para nuestro problema:

$$\text{mín } Z = 4x_{11} + 3x_{12} + x_{13} + x_{21} + \\ + 3x_{22} + 2x_{23} + 4x_{31} + 2x_{32} + x_{33}$$

sujeta a:

$$\begin{aligned} x_{11} + x_{12} + x_{13} &= 10.000 \\ x_{21} + x_{22} + x_{23} &= 15.000 \\ x_{31} + x_{32} + x_{33} &= 20.000 \\ x_{11} + x_{21} + x_{31} &= 7.500 \\ x_{12} + x_{22} + x_{32} &= 12.500 \\ x_{13} + x_{23} + x_{33} &= 25.000 \\ x_{ij} &\geqslant 0 \end{aligned}$$

Como vemos, las tres primeras restricciones indican que la suma de las cantidades transportadas desde una determinada fábrica a los distintos almacenes es igual a la producción mensual de aquélla. En cuanto a las tres siguientes, obligan a que la cantidad que recibe cada almacén satisfaga exactamente su demanda.

I.2.B. Planteamiento en forma tabular

Siguiendo el proceso indicado en la Figura I.4, veremos, en primer lugar, si existen diferencias entre las necesidades, N_T, y las disponibilidades, D_T:

$$N_T = \sum_{j=1}^{3} \text{demandas a satisfacer por } A_i = 7.500 + \\ + 12.500 + 25.000 = 45.000 \text{ unidades}$$

$$D_T = \sum_{i=1} \text{producción de } F_i = 10.000 + \\ + 15.000 + 20.000 = 45.000 \text{ unidades}$$

El resultado anterior indica que no es necesario introducir ninguna línea ficticia, por lo que podemos construir la Tabla I.9, en la que las cantidades de producto están expresadas en centenas.

Tabla I.9. Planteamiento tabular del problema del transporte

Destinos, A_j / Orígenes, F_i	A_1	A_2	A_3	Disponibilidades
F_1	[4] x_{11}	[3] x_{12}	[1] x_{13}	100
F_2	[1] x_{21}	[3] x_{22}	[2] x_{23}	150
F_3	[4] x_{31}	[2] x_{32}	[1] x_{33}	200
Necesidades	75	125	250	$N_T = 450$ / $D_T = 450$

I.2.C. Obtención de una solución básica

a) Método de la esquina noroeste

Todas las técnicas de obtención de una solución básica tienen en cuenta que la suma de las cantidades asignadas a una fila ha de ser igual a la disponibilidad correspondiente; análogamente la suma de las asignaciones de cada columna debe igualar a las necesidades respectivas. De esta forma, se asegura el cumplimiento de las restricciones del problema (ver I.2.A). El método de la esquina noroeste comienza asignando en la casilla superior izquierda (x_{11}) la máxima cantidad compatible con las restricciones representativas de la fila y columna que en ella confluyen. Así pues, se colocará el valor más bajo de entre las necesidades de la columna (75) y las disponibilidades de la fila (100). Por tanto, x_{11} = mín (75, 100) = 75, por lo que se satura la columna A_1, implicando que $x_{21} = x_{31} = 0$. Se continúa por la línea que aún no se ha saturado, en este caso la fila F_1, encontrándonos en la casilla (x_{12}) a la cual se asigna una cantidad, igual al mínimo entre las necesidades de A_2 (125) y las disponibilidades no asignadas de F_1 (100 − 75 = 25). De esta manera, $x_{12} = 25$, saturándose la fila F_1, lo cual da lugar a $x_{13} = 0$. Las necesidades de la columna A_2 no han sido totalmente satisfechas, por lo que deberemos seguir asignando hacia abajo, es decir, x_{22} = mín [(125 − 25), 150] = 100. Esto implica que $x_{32} = 0$, pues la fila A_2 ya tiene sus necesidades cubiertas. El proceso prosigue de forma análoga hasta que se consigue saturar todas las filas y columnas de la tabla. La solución básica obtenida es la indicada en la Tabla I.10. En este método no influye el tipo de función objetivo a optimizar.

El coste provocado por el programa de distribución anterior viene dado por:

$$Z = 4 \cdot 75 + 3 \cdot 25 + 3 \cdot 100 + 2 \cdot 50 + 1 \cdot 200 = 975 \text{ u.m.}$$

Tabla I.10. Solución inicial (método esquina N.O.)

Destinos, A_j / Orígenes, F_i	A_1	A_2	A_3	Disponibilidades
F_1	[4] 75 →	[3] 25 ↓	[1] —	100
F_2	[1] —	[3] 100 →	[2] 50 ↓	150
F_3	[4] —	[2] —	[1] 200	200
Necesidades	75	125	250	450

b) Método de los mínimos

Este método es más eficiente que el anterior, pues va asignando a las casillas con coste unitario más bajo las máximas cantidades posibles compatibles con las restricciones existentes. El resultado de este proceso es la solución inicial que aparece en la Tabla I.11; el orden seguido en la asignación fue: $x_{33} = 200$, $x_{21} = 75$, $x_{13} = 50$, $x_{12} = 50$ y $x_{22} = 75$.

I.2.D. Resolución del problema mediante el Algoritmo de Stepping-Stone

Se parte de la última solución básica obtenida en el apartado I.2.C. El procedimiento se basa en el símplex y utiliza los mismos conceptos. Las casillas con asignación corresponden a los vectores del programa base, siendo su número igual a 5, es decir, coincide con el de restricciones linealmente independientes[7] ($m + n - 1 = 3 + 3 - 1 = 5$), no presentándose, por tanto, degeneración.

Se comienza calculando el rendimiento marginal de los vectores proceso excluidos de la base, los cuales están representados por las casillas con asignación nula. Empezaremos por x_{11}, a la que asignaremos una unidad (ver Tabla I.11). Para que se sigan cumpliendo las restricciones del problema, habrá que disminuir, también en una unidad, una casilla de la columna A_1 y otra de la fila F_1; por ejemplo, en x_{12} y en x_{21}. Esto último hace que no se cumplan las restricciones correspondientes a A_2 y F_2; para evitarlo, sumamos una unidad a la casilla x_{22}. La Tabla I.11 muestra la operación realizada, la cual puede facilitarse utilizando una línea que, partiendo de la casilla a evaluar, vuelve a ella después de un recorrido en el que describe únicamente ángulos rectos y en cuyos vértices se sitúan casillas con asignación. Así, si introducimos una unidad en la casilla de partida, es necesario restar una en la que se encuentra en el siguiente vértice; a continuación, sumar otra en el siguiente, etc., hasta que se llegue de nuevo al punto de origen. Es fácil comprobar que sólo hay un camino que cumpla las condiciones antes mencionadas partiendo de una casilla sin asignación. La alteración operada en la tabla, en un proceso como el descrito, da lugar a un cambio en el rendimiento del programa básico igual al rendimiento marginal del proceso correspondiente a la casilla de partida, en nuestro caso el x_{11}, ya que se produce al introducirlo a nivel unidad en la solución inicial. En el ejemplo actual tenemos:

Asignación de una unidad a (1-1) ⇒ variación del coste del programa: +4 u.m.

Disminución de una unidad en (1-2) ⇒ variación del coste del programa: −3 u.m.

Aumento de una unidad en (2-2) ⇒ variación del coste del programa: +3 u.m.

Disminución de una unidad en (2-l) ⇒ variación del coste del programa: −1 u.m.

w_{11} = Rendimiento marginal de x_{11} = = Variación total del coste = 3 u.m.

Puesto que estamos minimizando, sólo interesará asignar en aquellas casillas con rendimiento marginal negativo, lo cual no ocurre con la x_{11}. Evaluaremos a continuación el resto de las casillas vacías (Tablas I.12, I.13 y I.14).

Tabla I.11. Rendimiento marginal de x_{11}

A_j / F_i	A_1	A_2	A_3
F_1	[4] (+1) ⊕ →	[3] 50 (−1) ⊖ ↓	[1] 50
F_2	[1] 75 (−1) ⊖ ↑	[3] 75 (+1) ⊕ ←	[2]
F_3	[4]	[2]	[1] 200

$w_{11} = 4 - 3 + 3 - 1 = 3$ u.m. ⇒ No interesa asignar

[7] Recordemos que una de las condiciones a cumplir por los diferentes programas efectuables es que el número de procesos que los componen debe ser igual al de restricciones (ver Apartado I.1.1).

Tabla I.12. Rendimiento marginal de x_{23}

F_i \ A_j	A_1	A_2	A_3
F_1	[4]	[3] 50 ⊕	[1] 50 ⊖
F_2	[1] 75	[3] 75 ⊖	[2] ⊕
F_3	[4]	[2]	[1] 200

$w_{23} = 2 - 3 + 3 - 1 = 1$ u.m. ⇒ No interesa asignar

Tabla I.13. Rendimiento marginal de x_{31}

F_i \ A_j	A_1	A_2	A_3
F_1	[4]	[3] 50 ⊖	[1] 50 ⊕
F_2	[1] 75 ⊖	[3] 75 ⊕	[2]
F_3	[4] ⊕	[2]	[1] 200 ⊖

$w_{31}=4-1+3-3+1-1=3$ u.m.⇒No interesa asignar

Tabla I.14. Rendimiento marginal de x_{32}

F_i \ A_j	A_1	A_2	A_3
F_1	[4]	[3] 50 ⊖	[1] 50 ⊕
F_2	[1] 75	[3] 75	[2]
F_3	[4]	[2] ⊕	[1] 200 ⊖

$w_{32} = 2 - 3 + 1 - 1 = -1$ u.m. ⇒ Interesa asignar

De los resultados anteriores deducimos que es interesante introducir en la solución la variable x_{32}, lo cual equivale a asignar en la casilla correspondiente. Ahora bien, hemos de tener en cuenta que, para que siga existiendo un número de procesos igual al de restricciones, será necesario sacar alguno de los que existían en el antiguo programa base. Esto se consigue asignando sucesivas cantidades a la casilla que representa el vector entrante, x_{32}, hasta que una de las casillas con asignación se anule como consecuencia del proceso descrito anteriormente. En nuestro caso, al ir aumentando la cifra asignada a x_{32}, las casillas que están en vértices (−) en la Tabla I.14, la (x_{12}) y la (x_{33}), disminuyen en una cantidad equivalente hasta que, para $x_{32} = 50$, x_{12} se anula. El proceso se detiene aquí pues, en caso contrario, x_{12} se haría menor que cero, lo cual iría contra las restricciones de no negatividad (implicaría transportar cantidades negativas). Se comprende fácilmente que el nivel del vector entrante coincida, pues, con el mínimo de los valores existentes en un vértice negativo. El nuevo programa efectuable se muestra en la Tabla I.15.

Tabla I.15. Solución óptima

F_i \ A_j	A_1	A_2	A_3	Disponibilidades
F_1	[4]	[3]	[1] 100	100
F_2	[1] 75	[3] 75	[2]	150
F_3	[4]	[2] 50	[1] 150	200
Necesidades	75	125	250	450

Evaluando las casillas sin asignación de la Tabla I.15, obtenemos:

$$
\begin{aligned}
w_{11} &= 4 - 1 + 1 - 2 + 3 - 1 = 4 \\
w_{12} &= 3 - 1 + 1 - 2 = 1 \\
w_{23} &= 2 - 1 + 2 - 3 = 0 \\
w_{31} &= 4 - 1 + 3 - 2 = 4
\end{aligned}
$$

Dado que no existe ningún rendimiento marginal negativo, la solución de la Tabla I.15 es óptima. Hay, sin embargo, una **solución alternativa** de ésta (ver Apartado I.1.2.2), la cual se consigue asignando en la casilla correspondiente a x_{23}, que presenta un rendimiento marginal nulo. Esta nueva solución óptima aparece en la Tabla I.16.

Tabla I.16. Solución alternativa

F_i \ A_j	A_1	A_2	A_3	Disponibilidades
F_1	[4]	[3]	[1] 100	100
F_2	[1] 75	[3]	[2] 75	150
F_3	[4]	[2] 125	[1] 75	200
Necesidades	75	125	250	450

I.2.E. Interpretación de los resultados

Así pues, la dos soluciones óptimas posibles, con las cifras indicando unidades, se extraen, respectivamente, de las Tablas I.15 y I.16:

— La producción completa de F_1 (100 centenas) pasa a A_1 ⇒ Coste = 10.000 · 1 = 10.000.
— La factoría F_2 envía 7.500 unidades a A_1 y 7.500 a A_2 ⇒ Coste = 7.500 · 1 + 7.500 · 3 = 30.000.
— La factoría F_3 envía 5.000 unidades a A_2 y 15.000 a A_3 ⇒ Coste = 5.000 · 2 + 15.000 · 1 = 25.000.

Coste total = 10.000 + 30.000 + 25.000 = 65.000 u.m.

— La producción completa de F_1 pasa a A_3 ⇒ Coste = 10.000 · 1 = 10.000.
— La factoría F_2 envía 7.500 unidades a A_1 y 7.500 a A_3 ⇒ Coste = 7.500 · 1 + 7.500 · 2 = 22.500.
— La factoría F_3 envía 12.500 unidades a A_2 y 7.500 a A_3 ⇒ Coste = 12.500 · 2 + 7.500 · 1 = 32.500.

Coste total = 10.000 + 22.500 + 32.500 = 65.000 u.m.

I.2.2. Otros aspectos de interés en el método del transporte

I.2.2.1. *Caso de maximización*

El procedimiento es análogo al desarrollado en el Ejemplo I.2. La diferencia estriba en que, una vez establecido el programa base, en el proceso de reasignación se considerarán convenientes aquellas casillas que den lugar a un rendimiento marginal positivo. El proceso terminará cuando la evaluación de todas las casillas sin asignación produzca rendimientos marginales negativos.

I.2.2.2. *Rutas imposibles*

En algunas ocasiones puede ocurrir que en el problema real se den una o más rutas imposibles, lo cual tiene lugar cuando no existe la posibilidad de pasar desde un origen i a un destino j, debiendo anularse la correspondiente variable, x_{ij}, en la solución óptima. Para conseguirlo, puede utilizarse un método de penalización análogo al del simplex, es decir, asignar a la casilla correspondiente un rendimiento M tan grande como se quiera, al cual se le afectará de un signo + o −, respectivamente, según se esté minimizando o maximizando la función objetivo.

I.2.2.3. *Solución degenerada*

Se produce cuando en la solución correspondiente a una determinada tabla, el número de casillas con asignación es inferior a $m + n - 1$ (número de restricciones linealmente independientes). En dicho caso no será posible la evaluación de todas las casillas sin asignación, pues, en algún momento, no podremos cerrar la línea quebrada que se utiliza a ese efecto (ver I.2.D). Para evitarlo, se coloca en una de las casillas vacías una cantidad ficticia, ε, que representa un número infinitamente pequeño y cuya única misión es permitir la evaluación mencionada. La única precaución a observar es que posibilite el cerrar una línea cuyos vértices sean únicamente casillas llenas. Esta precaución es necesaria sólo cuando la degeneración se produce en el momento inicial. Si, por el contrario, ésta surge

posteriormente, como consecuencia de la anulación de más de una casilla simultáneamente, pueden colocarse ε arbitrariamente en todas menos una de las anuladas.

I.3. LOS PROBLEMAS DE COLAS O LINEAS DE ESPERA

Un dilema que se suele presentar frecuentemente en cualquier centro de trabajo es el de intentar proporcionar los mayores niveles de servicio posibles sin necesidad de incrementar la capacidad de dicho centro.

En las **fábricas,** la carencia de los recursos necesarios origina colas de piezas o trabajos a la espera de ser procesados, que se almacenan delante de las máquinas. La primera consecuencia es la aparición de retrasos en el progreso del trabajo, mientras que la consecuencia última puede ser el incumplimiento de la fecha de entrega al cliente final. Aunque a veces las colas se disuelven y el retraso se puede recuperar en la siguiente fase del proceso, esto no siempre sucede. La situación más adversa es aquélla en la que el trabajo en espera es una persona, insatisfecha por el tiempo que está perdiendo en la cola. En este caso, propio de los **servicios,** la situación descrita puede ser bastante habitual en cuanto que los clientes tienden a solicitar los servicios de forma aleatoria, dificultando enormemente la correcta asignación de los recursos al centro de servicios. Ejemplos comunes de líneas o colas de espera los podemos encontrar en la caja de los supermercados, la compra de entradas para espectáculos, oficinas de correos, ventanillas de bancos y cajas de ahorros, mostradores de facturación en aeropuertos, hospitales, entradas y salidas de aparcamientos, etc.

Las colas o líneas de espera pueden formarse aunque el sistema no esté particularmente sobrecargado de trabajo. La clave está en cuál es la cantidad de trabajo total que dicho sistema sería capaz de desarrollar sin problemas y no en la carga media que puede soportar. Es fácil comprobar que en aquellos entornos en los que la variabilidad es muy limitada, o no se produce, no se observan colas de espera.

Es importante por tanto, que la Dirección de Operaciones tenga en cuenta la posible existencia de este fenómeno y tome las decisiones oportunas para evitar que se produzca, al mismo tiempo que se optimiza el proceso de planificación y el uso de la capacidad productiva disponible. Para ello, es preciso conocer las características básicas de los problemas de colas y de su tratamiento mediante el enfoque matemático desarrollado para el análisis de tales líneas. Los fundamentos de esta teoría fueron fijados a principios de siglo por el danés Erlang y no gozaron de un gran desarrollo hasta la segunda guerra mundial. Sin embargo, a partir de ese momento, su uso y difusión creció rápidamente (Stevenson, 1990, pág. 743). Su problemática está ligada a distintos aspectos importantes de la Dirección de Operaciones, tales como las decisiones sobre capacidad y la programación de talleres y servicios, el incremento de rapidez del sistema productivo gracias a la reducción del tiempo de suministro[8], el servicio de mantenimiento (Waller, 1994), etc.

I.3.1. Caracterización del problema a tratar

El *objetivo* esencial de la teoría de colas será *la minimización de los costes totales,* que proceden esencialmente de dos fuentes: la propia espera y la capacidad del

[8] Sobre este aspecto pueden consultarse Suri (1989) y Suri y Treville (1993).

sistema. Esta última hace referencia al coste de mantener un determinado nivel de servicio. Los relacionados con la espera comprenden los costes de las personas que prestan el servicio o desempeñan alguna tarea en el proceso productivo, el coste del espacio de espera de los clientes o productos en curso y aquellos costes derivados de la posible pérdida de clientes o de ventas por no haber sido atendidos a tiempo (Stevenson, 1990, pág. 744). Este último concepto es bastante difícil de calcular, porque en numerosas ocasiones se trata de un coste intangible, que no se ajusta a la lógica contable. El fin último será encontrar un equilibrio entre el coste de proporcionar un determinado nivel de servicio mediante una cierta capacidad y el coste de la espera de los clientes (Figura I.5). Seguidamente abordaremos los distintos factores a considerar en el estudio de las líneas de espera.

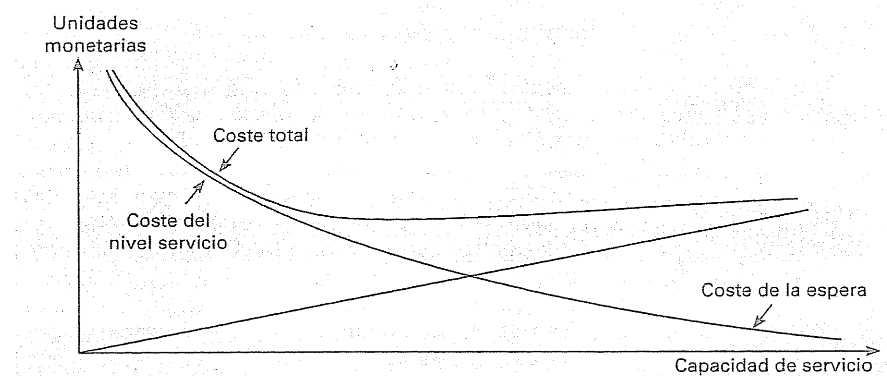


Figura I.5. Costes asociados al fenómeno de líneas o colas de espera.

I.3.1.1. *Tipos de colas*

La mayor o menor complejidad de las colas de espera dependerá de dos factores básicos: los **servidores o canales** y las **fases o etapas** a procesar. Una línea simple incluirá sólo **un servidor y una etapa** de servicio (e.g.: un semáforo). Si, por el contrario, consideramos las distintas ventanillas del peaje de un puente, estaríamos ante un caso con **múltiples servidores y una sola etapa.** Varias señales sucesivas de stop en una carreta conforman el caso de **un sólo tipo de servidor** (la señal de stop) y **varias etapas** (cada parada indicada por la señal se considera una etapa). Los diferentes controles en la terminal de un aeropuerto, constituyen un caso de **múltiples servidores** (pasaportes y aduanas) y **varias fases** (cada parada). La diferenciación entre cada caso constituye el objeto del **análisis de colas,** existiendo diferentes tratamientos en cada situación.

I.3.1.2. *Tamaño de la «población» a atender*

Es importante poder determinar cuál será el número potencial de clientes o productos en curso que habrá que atender. En algunos casos, la demanda de prestación del servicio no estará limitada por ningún factor (*población infinita*), lo que puede conducir a que el posible número de clientes a servir exceda significativamente de la capacidad del sistema (e.g.: la ventanilla de una sucursal bancaria, la caja de un supermercado, etc.). En otros casos, la población es *finita*, es decir, cada servidor puede atender a un número predeterminado de clientes (por ejem-

plo: el número de profesores y profesoras asignados a cada administrativo/a del departamento).

I.3.1.3. *Patrones de llegada y servicio*

De entre los diferentes casos que se pueden presentar en relación con ambos factores de variabilidad, el más sencillo es aquél en el que las *llegadas* están *espaciadas uniformemente* y los *tiempos de servicio* son *constantes*. Si las llegadas son más frecuentes que las que puede atender la tasa de servicio, el sistema estará en situación de inestabilidad. El flujo de clientes o productos en curso deberá descender o el servicio deberá acelerarse, puesto que, en caso contrario, las líneas de espera pueden crecer sin límite. En el caso de que las llegadas sean menos frecuentes que el máximo asumible por la tasa de servicio, se dice que el sistema es estable y que el tiempo de espera es nulo. La realidad suele ser diferente, porque las llegadas no se producen de forma homogénea ni lo tiempos de servicio son constantes, lo que, por una parte, hace que aparezcan las colas y, por otra, dificulta la identificación de la posible ociosidad de los recursos.

Cuando se trata de un *sistema de flujo continuo* (condición de estado estacionario), el tiempo medio de espera en la cola es estable. No obstante, son numerosas las entidades que no operan con este tipo de proceso, pudiéndonos encontrar con situaciones en las que una gran parte de su tiempo productivo esté dedicado al arranque y parada de los equipos, de modo que nunca se alcance el estado estacionario. En otros casos, algunos sistemas comienzan sus operaciones con los equipos prácticamente ociosos, y rápidamente alcanzan su estado estacionario. Si en lugar de considerar procesos productivos se estudian procesos de servicios, alcanzar dicho estado es aún más complejo, pues no se puede predecir con facilidad la tasa de llegada de las personas (a diferencia de lo que ocurre con los productos en curso). Hay que añadir, además, que las reacciones humanas ante la espera en las colas difiere sensiblemente de la de los productos en curso, los cuales, como es obvio, no tienen capacidad para abandonar la cola o mostrar comportamientos airados.

En ciertos casos, la variabilidad de la llegada y/o de la prestación del servicio pueden ser descritas mediante el uso de distribuciones teóricas de probabilidad. Así, es bastante común asumir que la tasa de llegada de los clientes se distribuye siguiendo una función de Poisson, mientras que la tasa de prestación del servicio estaría mejor descrita por una función exponencial negativa (Figura I.6). La evidencia empírica ha demostrado que, mientras que lo primero suele ser cierto, lo segundo es menos frecuente. Por ello, en la práctica es necesario comprobar que estas hipótesis se cumplen, acudiendo normalmente al contraste estadístico mediante tests de ajuste como Chi-cuadrado.

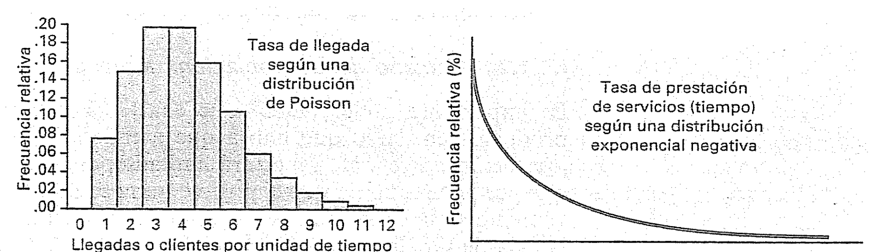


Figura I.6. Funciones de distribución Poisson y Exponencial Negativa.

I.3.1.4. *Criterio a seguir en la prestación del servicio*

La regla más común es atender en primer lugar a la primera persona que solicita el servicio. No obstante, son también frecuentes las situaciones en las que esta regla se ha de modificar; por ejemplo, dar prioridad a la fabricación de un pedido retrasado aunque ya existan otros pedidos en curso de fabricación, la atención de urgencias hospitalarias, prioridad a la atención de algún cliente frente al resto (práctica discutible pero real), etc.

I.3.1.5. *Criterios de medida para evaluar el funcionamiento del sistema*

- Número medio de clientes o productos en curso esperando, tanto en la cola como en las operaciones del sistema.
- Tiempo medio de espera, tanto en la cola como en las operaciones.
- Utilización del sistema, expresada como porcentaje utilizado en la capacidad disponible.
- Coste asociado a un nivel dado de capacidad y su línea de espera.
- Probabilidad de que cada cliente o producto en curso que llega al sistema tenga que hacer cola de espera.

De estas medidas, la más compleja es la relativa a la utilización de la capacidad del sistema, que nos indica la medida en que los distintos recursos pueden estar ociosos. Contrariamente a lo que a simple vista podría pensarse, fijar como objetivo una utilización del 100 por 100 no sería realista[9], puesto que cuanto más crece la utilización, más crece el tiempo medio de espera en la cola y el número medio de personas o productos en la misma. Consecuentemente, el responsable del sistema ha de buscar un nivel de utilización que minimice la suma de los costes de espera y de capacidad como ya se indicó anteriormente.

I.3.1.6. *Representación esquemática de la estructura de los problemas de colas*

Los tipos de problemas que se presentan con mayor frecuencia aparecen recogidos esquemáticamente en el Cuadro I.2.

Cuadro I.2. Estructuras básicas de los problemas de colas

N.º de canales	Tipo de población	Función de distribución de las llegadas	Criterio para la prestación del servicio	Función de distribución de la prestación de servicios	Longitud de cola permisible
Uno	Infinita	Poisson	PLLPS[10]	Exponencial negativa/ constante	Ilimitada/limitada
Múltiples	Infinita	Poisson	PLLPS/múltiples	Exponencial negativa	Ilimitada/limitada
Uno	Finita	Poisson	PLLPS	Exponencial negativa	Ilimitada

[9] Ni conveniente para todos los puestos de trabajo (ver Capítulo 8).
[10] PLLPS: Primero en llegar, primero en ser servido.

I.3.2. Modelización del problema

La Dirección de Operaciones cuenta con un amplio arsenal de modelos de colas entre los que elegir. Se comenzará con las opciones básicas para, gradualmente, ir ampliando la dificultad y el alcance.

I.3.2.1. *Modelización básica*

Comenzaremos con la caracterización de las variables a considerar. Cada llegada a una estación de trabajo, equipo o servicio, será definida como un **trabajo.** La *tasa media de trabajos por unidad de tiempo* será representada por λ, parámetro que describe la distribución de probabilidad que siguen las llegadas de los trabajos. La *tasa media de trabajos servidos por unidad de tiempo* se representará mediante μ, parámetro que describe la distribución de probabilidad que caracteriza al tiempo de servicio. Habrá que precisar asimismo las características del caso concreto en relación con los factores comentados en I.3.1. El Cuadro I.3 ilustra los distintos conceptos a emplear y sus símbolos. Cada tipo de problema de colas tiene una estructura (ver Cuadro I.2) y ecuaciones de solución ligeramente diferentes, las cuales se han recogido en el Cuadro I.4.

Cuadro I.3. Notaciones básicas para colas infinitas y finitas

Notación para colas infinitas	Notación para colas finitas
λ = Tasa de llegadas	D: Probabilidad de que un trabajo tenga que estar esperando en la cola
μ = Tasa de prestación de servicios	F: Factor de eficiencia (mide el efecto de tener que esperar en la cola)
$1/\lambda$ = Tiempo promedio entre llegadas	H: Número promedio de unidades que se atienden
$1/\mu$ = Tiempo promedio de prestación de servicio	J: Población fuente menos los del sistema (N-n)
ρ = Utilización potencial de la instalación del servicio (definida como λ/μ)	L: Número promedio de unidades en cola
L_q = Número medio de trabajos (llegadas) esperando a ser atendidos en la cola	M: Número de canales de servicio
L_s = Número medio de trabajos (llegadas) en el sistema, incluyendo a cualquiera que se esté atendiendo	n: Número promedio de trabajos en el sistema (incluyendo el que se esté atendiendo)
W_q = Tiempo medio de espera de los trabajos en la cola	N: Número de unidades en la población fuente
W_s = Tiempo medio de espera de los trabajos en el sistema	P_n: Probabilidad de que haya exactamente n unidades en el sistema
n = Número de unidades en el sistema	T: Tiempo promedio para realizar el servicio
M = Número de canales de servicio idénticos	U: Tiempo promedio entre dos solicitudes consecutivas de prestación de servicios por parte del mismo trabajo
$L_{máx}$ = Número esperado máximo de trabajos en línea	W: Tiempo promedio de espera en cola
P_0 = Probabilidad de que haya cero trabajos en el sistema	X: Factor de servicio o proporción del tiempo de servicio requerido
P_n = Probabilidad de que haya n trabajos en el sistema	
W_d = Tiempo medio de espera para una llegada no servida inmediatamente	
P_w = Probabilidad de espera en la cola	

Cuadro I.4. Ecuaciones para la resolución de los diferentes problemas de colas

Estructura del problema	Ecuaciones
Un canal; tasa de llegadas Poisson; tasa de prestación de servicios exponencial negativa; población infinita; criterio de servicio: primero en llegar, primero en servir; longitud de la línea: ilimitada	$\rho = \lambda/\mu$ [1] $L_q = \lambda^2/\mu(\mu - \lambda)$ [2] $L_s = \lambda/(\mu - \lambda)$ [3] $W_q = \lambda/\mu(\mu - \lambda)$ [4] $W_s = 1/(\mu - \lambda)$ [5] $P_n = (1 - (\lambda/\mu))(\lambda/\mu)^n$ [6] $P_0 = 1 - (\lambda/\mu)$ [7]
Un canal; tasa de llegadas Poisson; tasa de prestación de servicios constante; población infinita; criterio de servicio: primero en llegar, primero en servir; longitud de la línea: ilimitada	Se mantienen las ecuaciones [1], [6] y [7] y se añaden: $L_q = \lambda^2/2\mu(\mu - \lambda)$ [8] $L_s = L_q + (\lambda/\mu)$ [9] $W_q = \lambda/2\mu(\mu - \lambda)$ [10] $W_s = W_q + (1/\mu)$ [11]
Múltiples canales; tasa de llegadas Poisson; tasa de prestación de servicios exponencial negativa; criterio de servicio: primero en llegar, primero en servir; longitud de la línea: ilimitada	Se mantiene la ecuación [1], incorporando a la misma M: $\rho = \lambda/M\mu$ [1*b*], para indicar el número de canales o servidores, y se añaden: $L_q = [(\lambda\mu(\lambda/\mu)^M)]/[(M - 1)!(M\mu - \lambda)^2]P_0$ [12] $L_s + (\lambda/\mu)$ [13] $W_q = [P_0/\mu MM!(1 - (\lambda/\mu M)^2](\lambda/\mu)^M$ [14] $W_s = W_q + (1/\mu)$ [15] $P_0 = 1/[\Sigma_{n=0}^{M-1}((\lambda/\mu)^n/n!) + [(\lambda/\mu)^M/M!(1 - (\lambda/\mu M))]]$ [16] $P_w = (\lambda/\mu)^M P_0/M!(1 - (\lambda/\mu M))$ [17] y $W_d = 1/(M\mu - \lambda)$ [18]
Múltiples canales; tasa de llegadas Poisson; tasa de prestación de servicios exponencial negativa; criterio de servicio: primero en llegar, primero en servir; longitud de la línea: limitada	Las mismas expresiones que en el caso anterior más: $n = \log K/\log \rho$ [19], o bien: $n = \ln K/\ln \rho$ [20] donde: $K = (1 - \%\ \text{especificado})/L_q(1 - \rho)$ [21]
Múltiples canales; tasa de llegadas Poisson; tasa de prestación de servicios exponencial negativa; criterio de servicio: primero en llegar, primero en servir; longitud de la línea: limitada; *población finita*	$X = T/(T + U)$ [22] $L = N(1 - F)$ [23] $W = L(T + U)/(N - L) = (T(1 - F))/XF$ [24] $J = NF(1 - X)$ [25] $H = FNX$ [26] $N = J + H + L$ [27] $F = (J + H)/(J + H + L)$ [28] probabilidad de que un trabajo espere en la fila: D (D y F aparecen recogidos en el Apéndice estadístico (al final del libro), que es una versión abreviada de la utilizada normalmente)

Adicionalmente, y con independencia de la estructura concreta de cada problema, habrán de cumplirse las relaciones básicas siguientes:

- La relación entre la tasa de llegadas y la tasa de prestación de servicios puede considerarse indicativa del número medio de las llegadas que están siendo atendidas.
- El número medio de trabajos (llegadas) en el sistema es la suma del número medio de unidades en la cola más el número medio de trabajos que están siendo atendidos.
- El tiempo promedio de espera en la línea es el cociente entre el número medio de trabajos en línea y la tasa de llegada.
- El tiempo promedio de espera en el sistema es la suma del tiempo de espera en la cola más el tiempo de servicio.
- La utilización del sistema es la relación entre la tasa de llegadas y la tasa de servicio, dependiendo esta última del número de canales o servidores del sistema.
- Todos los problemas de población infinita requieren que la utilización del sistema sea inferior a uno.

I.3.2.2. *Variabilidad en las tasas de llegada de trabajos y de servicios en sistemas de un único servidor o canal*

Es posible disponer de estimaciones representativas de las tasas de llegada de trabajos y prestación de servicios, a partir de las cuales pueden construirse las funciones de distribución de las probabilidades de ocurrencia. En ese caso, dependiendo del tipo de función de que se trate, aplicaremos las expresiones que aparecen en el Cuadro I.4.

a) Un único canal o servidor y tiempo de servicio exponencial

Se emplearán las expresiones [1], [2], [3], [4], [5], [6] y [7]. Veremos a continuación un sencillo ejemplo ilustrativo.

EJEMPLO I.3. Un canal y tiempo de servicio exponencial

Los responsables del servicio de trenes de cercanías de Madrid están considerando la posibilidad de instalar una ventanilla para la venta de billetes en un conocido centro comercial de la Zona Sur. Dada la novedad del servicio, no se espera que más de 12 clientes acudan a la ventanilla por hora (λ), habiéndose estimado que las solicitudes seguirán una distribución de Poisson. Se asume que el tiempo de prestación de servicios (μ) sigue una función de distribución exponencial negativa, cuya media, de acuerdo con los datos recabados en otras ventanillas, instaladas en otros centros comerciales, puede estimarse en cuatro minutos por solicitud. Este último dato puede transformarse de la siguiente forma: μ = 1 cliente/(4 minutos/60 minutos por hora) = 15 clientes por hora. A partir de esta información, se desea determinar:

a) La *utilización* de la ventanilla: $\rho = \lambda/\mu = 12/15 = 0{,}8 = 80\,\%$.

b) El *porcentaje de tiempo* que la *persona* ocupada en la ventanilla permanecerá *ociosa*: $1 - \rho = 1 - 0{,}8 = 0{,}2 = 20\,\%$.

c) El *número esperado de clientes haciendo cola* mientras esperan ser atendidos: $L_q = \lambda^2/\mu\,(\mu - \lambda) = 12^2/15\,(15 - 12) = 3{,}2$ clientes.

d) El *tiempo medio* que el cliente habrá de permanecer *frente a la ventanilla* (incluyendo el tiempo en que es atendido): $W_s = 1/(\mu - \lambda) = 1/3 = 0{,}3$.

e) La *probabilidad de que no acuda ningún cliente* (cero clientes en la ventanilla) (P_0) y de que haya 8 clientes esperando en la ventanilla (esto es, en la cola y siendo atendidos) (P_8): $P_0 = 1 - (\lambda/\mu) = 1 - (12/15) = 0{,}2 = 20\,\%$ y $P_8 = P_0\,(\lambda/\mu)^8 = 0{,}2\,(12/15)^8 = 0{,}03 = 3\,\%$.

b) Un único canal o servidor y tiempo de servicio constante

Las Ecuaciones [8], [9], [10] y [11] del Cuadro I.4 son empleadas para calcular, respectivamente, el número medio de trabajos esperando en la cola (L_q), en el sistema (L_s), el tiempo medio de espera en la cola (W_q) y en el sistema (W_s), cuando la tasa de prestación de servicios es constante (ver Ejemplo I.4).

Al reducir la variabilidad de uno de los parámetros, las líneas de espera se pueden acortar sensiblemente. El efecto de que la tasa de servicios sea constante se traduce, como puede apreciarse al analizar las Ecuaciones [8] y [10], en una cifra para los trabajos esperando en la cola y para el tiempo de espera en ésta, que es la mitad de los valores de ambos cuando la tasa de servicios se distribuye según una función exponencial negativa.

EJEMPLO I.4. Un canal y tiempo de servicio constante

Partiendo de los datos del ejemplo anterior y suponiendo que la tasa de prestación de servicios es constante, se desea conocer: L_q, L_s, W_q y W_s.

Aplicamos las ecuaciones correspondientes del Cuadro I.4 y sustituimos las variables por su valor:

$L_q = \lambda^2/2\mu(\mu - \lambda) = 12^2/2(15)(15 - 12) = 144/90 = 1{,}6$ personas.

$L_s = L_q + (\lambda/\mu) = 1{,}6 + 12/15 = 2{,}4$ personas.

$W_q = \lambda/2\mu(\mu - \lambda) = 12/2(15 - 12) = 12/90 = 0{,}13$ min.

$W_s = W_q + (1/\mu) = 0{,}13 + 1/15 = 0{,}19$ minutos.

La sencillez del cálculo y el potencial de las fórmulas del análisis de colas, junto a sus limitaciones inherentes, son puestos de manifiesto en el Ejemplo I.5.

EJEMPLO I.5. Diferentes aplicaciones de la teoría de colas

Rapi-Repa, S. A., es una empresa de reparaciones de averías domésticas urgentes. En la actualidad, la plantilla de la empresa no tiene dificultades para atender a las llamadas que se reciben. De la observación del libro de registro de solicitudes se desprende que el tiempo que transcurre entre llamadas oscila en torno a los 70 minutos, lo que se puede interpretar como que la *tasa media de llegada* (λ) es 1/70 o 0,014 llamadas por minuto. Este libro también recoge el tiempo medio que cada empleado suele necesitar para efectuar la reparación, cifra que toma el valor de 50 minutos, esto es, la *tasa de prestación de servicios media* (μ) es de 1/50 o 0,02 reparaciones por minuto. Estos datos indican que la tasa de servicio es 0,42 veces más rápida que la tasa de llamadas, lo que se puede interpretar como que el servicio, a primera vista es aceptable. Esta información también puede ser utilizada para calcular la *utilización del servicio* (ρ) y su *tiempo ocioso* ($1 - \rho$) y poder determinar si se están aprovechando adecuadamente los recursos de la empresa. Así, la utilización, medida por el cociente entre la tasa de llegada y la tasa de servicio, asciende a 0,014/0,02 = 0,71, esto es, el sistema está utilizado en un 71 por 100, lo que nos indica que está ocioso en un 29 por 100. Los empleados afirman que esta ociosidad no es tal, porque durante el tiempo que se encuentran en el taller, están realizando otras tareas, como la limpieza del establecimiento y de sus herramientas, la adquisición de materiales auxiliares, etc., con el fin de estar siempre preparados para atender las urgencias. Aunque estas tareas son importantes, la Dirección se pregunta si no podrían ser realizadas por personal auxiliar, con salarios más bajos que los de la plantilla especializada. El responsable del servicio de reparaciones sugiere reducir la plantilla para eliminar esta ociosidad y al mismo tiempo conseguir un ahorro en la masa salarial. Entiende que podría traspasar parte de sus empleados a otra sección pues, si bien con ello se reduciría la tasa de prestación de servicios, no afectaría al nivel de servicios, pues aquélla es bastante más rápida que la tasa de llamadas. La Dirección le pide que demuestre lo acertado de su sugerencia.

Según el responsable de reparaciones, si la plantilla se reduce en un 20 por 100, la tasa de servicio media será de 1/60 o 0,016 reparaciones por minuto. Su comparación con la tasa de llamadas (0,014) nos indica que, por término medio, se pueden atender todas las llamadas y que la utilización del sistema es del 87,5 por 100 (recuérdese que la utilización se calcula como cociente entre ambas tasas). La Dirección no está muy convencida de que la reducción de la plantilla y de la tasa de servicio no vayan a afectar seriamente al nivel de servicio de la empresa, por lo que pide al responsable de reparaciones que considere dos situaciones diferentes:

- Caso *a*): La tasa de llamadas sigue una función Poisson y la tasa de servicios es constante.
- Caso *b*): La tasa de llamadas sigue una función Poisson y la de prestación de servicios una exponencial negativa.

Debe determinarse para ambos:

- Tiempo medio de espera (en cola) antes y después de la reducción de la tasa de servicio (W_q).
- Número medio de personas en espera (en cola) antes y después de la reducción de la tasa de servicio (L_q).

La solución a las cuestiones planteadas puede determinarse aplicando las ecuaciones [8] y [10] en el primer caso y [2] y [4] en el segundo (Cuadro I.4).

Caso a)

Para la situación actual, W_q y L_q tomarán los siguientes valores:

$W_q = 0{,}014/2(0{,}02)(0{,}02 - 0{,}014) = 58{,}33$ minutos de espera (media).

$L_q = 0{,}014^2/2(0{,}02)(0{,}02 - 0{,}014) = 0{,}83$ personas en cola (media).

Si se reduce la plantilla en un 20 por 100:

$W_q = 0{,}014/2(0{,}016)(0{,}016 - 0{,}014) = 218{,}75$ minutos de espera (media).

$L_q = 0{,}014^2/2(0{,}016)(0{,}016 - 0{,}014) = 3{,}06$ personas en cola (media).

Como se desprende de los datos anteriores, la reducción de la plantilla en un 20 por 100 daría lugar a una importante reducción de los niveles de servicio: el tiempo medio de espera y el número medio de personas esperando se multiplicarían por valores superiores a 3,5.

Caso b)

Si la tasa de servicios no es constante, los tiempos medios de espera y el número de personas esperando, antes y después de la reducción propuesta ascenderían a:

$W_{q)\text{antes}} = 116{,}66$ minutos de espera (media)
$W_{q)\text{después}} = 437{,}5$ minutos de espera (media)
$L_{q)\text{antes}} = 1{,}633$ personas en cola (media)
$L_{q)\text{después}} = 6{,}125$ personas en cola (media)

Puede apreciarse, pues, que la utilización del análisis de colas ha servido, por una parte, para demostrar su error al responsable de operaciones, y, por otra, para observar la importancia de determinar con la mayor exactitud posible la función de distribución seguida por la tasa de llegada de trabajos y la tasa de prestación de servicios. En el ejemplo considerado, aún en el caso de que los costes salariales fuesen muy elevados, la decisión de la reducción de plantilla tendría que tener en cuenta los posibles costes asociados a la espera, que pueden ser tan elevados o más que los salariales. Hay que considerar adicionalmente que, al reducir la plantilla, el tiempo que los empleados podrían dedicar a las tareas de mantenimiento se reduciría, lo que podría llevar a una reducción adicional de la tasa de servicio si no se contase con el tiempo suficiente ncesario para realizar tales tareas.

I.3.2.3. *Variabilidad en las tasas de llegada de trabajos y de servicios en sistemas de múltiples canales*

Nos encontraremos ante un sistema de **múltiples canales** cuando existen *varios servidores que trabajan independientemente para atender a los trabajos que van llegando al sistema.* Para poder aplicar los modelos existentes es necesario partir de las siguientes hipótesis:

- La tasa de llegada se distribuye según una Poisson y la de servicios según una exponencial negativa.
- Todos los canales trabajan a la misma velocidad o tasa de servicio.
- Los trabajos forman una única fila y se sigue el criterio de atender primero al primer trabajo que llega a la fila.

La formulación a emplear aparece en el Cuadro I.4. y la correspondiente nomenclatura en el Cuadro I.3. La mayor complejidad de estas cuatro expresiones conduce a que, en la práctica, su utilización sea sustituida por el empleo de tablas (incluidas en el Apéndice estadístico al final del libro) que recogen los valores de λ/μ, M, L_q y P_0. Estas tablas pueden también ser empleadas para el caso de que sólo se cuente con un servidor o canal en el sistema, en cuyo caso M es igual a 1. A continuación se recogen dos ejemplos que ilustran dos opciones alternativas de empleo de las fórmulas anteriores.

EJEMPLO I.6 (*a* y *b*). Un caso de cola con múltiples canales

Viernes Seguros es una entidad que se dedica al transporte de viajeros que prefieren no conducir tras haber ingerido alguna copa de más. En su local dispone de doce vehículos para la prestación de este servicio. Durante las noches de viernes y sábados la frecuencia de las llamadas se intensifica, recibiéndose una media de nueve llamadas por hora (λ). La tasa de llamadas sigue una distribución de tipo Poisson. El tiempo de servicio se ha estimado en una media de 55 minutos por cliente, pudiéndose representar la tasa de servicio según una función de distribución exponencial negativa. La plantilla de esta empresa cuenta con doce conductores, uno por vehículo, para atender el servicio. Se desea conocer la utilización del sistema y el rendimiento de las variables L_q, L_s, W_q, W_s, P_0, W_d y P_w.

Solución

$\lambda = 9$ llamadas por hora y $\mu = 1/(55/60) = 1{,}09$ clientes servidos por hora $\Rightarrow \lambda/\mu = 9/1{,}09 = 8{,}2$

Para $\lambda/\mu = 8{,}2$ y $M = 12$, los valores recogidos en la Tabla para L_q (número medio de trabajos en espera) y P_0 (probabilidad de cero trabajos en el sistema) son 0,347 y 0,00026, respectivamente. Calculamos a continuación el resto de los parámetros:

$L_s = L_q + \lambda/\mu = 0{,}347 + 8{,}2 = 8{,}547$ clientes en el sistema por término medio.

$W_q = L_q/\lambda = 0{,}347/9 = 0{,}0385$ horas promedio de espera en la cola.

$W_s = W_q + 1/\mu = 0{,}0385 + 1/1{,}09 = 0{,}95593$ horas promedio de espera en el sistema.

$W_d = 1/(M \times \mu - \lambda) = 1/(12\,(1{,}09) - 9) = 0{,}24$ horas de espera antes de ser atendido (por término medio).

$P_w = (\lambda/\mu)^M Po/M!(1 - \lambda/M\mu) =$
$= (8{,}2)^{12}(0{,}00026)/12!\ (1 - (9/12 \times 1{,}09)) = 0{,}160$, esto es, la probabilidad de tener que esperar antes de ser atendido asciende al 16 por 100.

En ocasiones, se puede estar interesado en determinar qué *capacidad* sería necesaria para alcanzar un determinado valor de las diferentes medidas del rendimiento esperado. En este caso, el proceso a seguir sería justamente el inverso al que se acaba de adoptar. Para ilustrarlo, supongamos que la empresa considerada está estudiando la conveniencia de situar parte de su flota de vehículos en las proximidades de la zona de mayor concentración de discotecas de la ciudad. Se quiere determinar cuántos vehículos habría que trasladar al nuevo emplazamiento, de manera que los clientes no tuvieran que esperar en la cola durante un tiempo superior a 20 minutos ($W_q \leqslant 20$ minutos). La información disponible indica que la tasa de llamadas (λ) se puede cifrar en seis clientes por hora y el tiempo de servicio (μ) se estima en 45 minutos por cliente. Se trata por tanto de determinar el valor de M.

A partir de los datos disponibles, sabemos que: $W_q \leqslant 20$ minutos (0,33 horas), $\lambda = 6$ y $\mu = 1/(45/60) = 1{,}33$. Podemos calcular $\rho = \lambda/\mu = 6/1{,}33 = 4{,}5$.

Tomando λ y W_q se determina $L_q = \lambda W_q = 6\,(0{,}33) = 1{,}98$.

El número medio de clientes esperando no debería sobrepasar, pues, la cantidad de 1,98. Buscamos en la tabla el valor de M para $\lambda/\mu = 4{,}5$ y $L_q = 1{,}98$ y obtenemos una cifra de seis vehículos.

Cuando se toman decisiones sobre capacidad, no sólo tiene interés el decidir cuántos equipos serán necesarios, sino que, además, ha de tenerse en cuenta la **distribución en planta** de estos equipos y, consiguientemente, el espacio necesario y disponible para situar las posibles líneas de espera que se puedan formar. Esta situación aparece recogida en el Cuadro I.2, caracterizada como un problema de múltiples canales en el que la longitud de la cola está limitada. Desde un punto de vista teórico, si el sistema puede atender a una población infinita, la longitud de la fila que se podría formar también podría serlo. En tal caso, cualquiera que fuese el espacio asignado nunca sería suficiente. Sin embargo, desde un punto de vista práctico, esta longitud se suele acortar mediante la utilización de una restricción para el tiempo máximo que los trabajos podrían estar esperando en la cola. En este sentido, el diseño de la línea de espera habrá de ser tal que sólo en un número determinado de casos se supere esta restricción temporal. Así, por ejemplo, si se desea un nivel de servicio del 98 por 100, sólo en un 2 por 100 de los casos los clientes permanecerán en la línea más tiempo del deseado. Para que este objetivo se cumpla, la línea ha de ser diseñada de modo que nunca haya más de *n* clientes

en la cola. Las ecuaciones a emplear se han recogido en el Cuadro I.4 ([19], [20] y [21]). No es frecuente que n tome un valor entero, por lo que se suele redondear por exceso, salvo que la parte no entera sea inferior a 0,1, en cuyo caso se redondea por defecto (Ejemplo I.7).

EJEMPLO I.7. Determinación de la capacidad (máquinas) necesaria en función del nivel de servicios (múltiples canales y longitud de la cola de espera)

Un centro de máquinas opera bajo los parámetros $\lambda = 7$ por hora, $\mu = 6$ por hora y $M = 3$. La persona responsable del centro de máquinas quiere que el nivel de servicio sea del 98 por 100, por lo que necesita determinar cuál debe ser la longitud de la fila o cola para que se cumpla este objetivo.

De acuerdo con la información disponible, $\lambda/\mu = 7/6 = 1,16$ y $\rho = 7/3(6) = 0,38$. Buscamos en la tabla correspondiente qué valor de L_q pertenece a este valor de λ/μ y de M, y obtenemos $L_q = 0,094$, por lo que, sustituyendo:

$$n98 = (\log K)/(\log 0,38) = n[\log (1 - 0,98)/0,094(1 - 0,38)]/\log 0,38 = 1,1 \approx 1 \text{ máquina}$$

I.3.2.4. *Modelo de colas con una población finita*

Este modelo es el adecuado cuando la población a atender está limitada y, por tanto, los trabajos están controlados (por ejemplo: un camarero ha de atender a un número determinado de mesas; en este caso, el tamaño de la población coincide con el número de mesas asignadas). En los casos de población finita se asume que la tasa de llegada seguirá una función del tipo Poisson y que la tasa de prestación de servicios se distribuirá según una exponencial negativa. La diferencia fundamental con respecto al caso de población infinita estriba en que la tasa de llegada de trabajos dependerá del número de éstos que hayan llegado ya o, en otras palabras, de la longitud que haya alcanzado la línea.

El tratamiento matemático de este tipo de modelos de población finita es relativamente complejo, por lo que, en la práctica, se suele acudir al empleo de tablas (incluidas al final del libro), conjuntamente con el empleo de una serie de notaciones descritas en el Cuadro I.3, cuya expresión aparece recogida en el Cuadro I.4. El procedimiento a seguir se expone a continuación (ver Ejemplo I.8):

- Se comienza dando valores a N (tamaño de la población), M (número de canales), T (tiempo de servicio) y U (tiempo entre dos solicitudes consecutivas de prestación de servicios del mismo cliente o trabajo).
- A partir de dichos valores se determina el factor de servicio, X.
- Se busca la sección de la tabla que corresponde a N.
- A partir del valor de X, se buscan los valores de D y F que corresponden a M.
- Se utilizan los valores de N, M, X, D y F que vayan a ser necesarios para determinar las medidas del rendimiento del sistema.

EJEMPLO I.8. Modelos de colas para población finita

En la cooperativa quesera Montiel, un operario se encarga de arrancar y parar cinco de las máquinas empleadas en el sistema productivo. El tiempo utilizado en esta tarea se distribuye según una función exponencial negativa de media 8 minutos por ciclo. Estas máquinas trabajan normalmente durante 55 minutos entre cada arranque y parada, tiempo que también puede considerarse que sigue una distribución exponencial. La encargada de esa sección necesita conocer una serie de parámetros que calcularemos más adelante.

Comenzamos asignando valores a N, T, U y M para poder calcular X: $N = 5$ máquinas, $T = 8$ min, $U = 55$ min y $M = 1$ canal, de donde $X = T/(T + U) = 8/63 = 0,127$ (factor de servicio).

Seguidamente, se busca en la tabla la sección correspondiente a $N = 5$ y al valor de $X = 0,127$ (aunque tomaremos 0,130, pues no aparece y 0,125 es un factor de servicio inferior al deseado) y $M = 1$. Se obtiene para D un valor igual a 0,489 y para F la cifra 0,914.

A partir de estos datos, calcularemos los parámetros que desea conocer la encargada de la sección:

a) El número medio de máquinas que están esperando ser atendidas por el operario: $L = N(1 - F) = 5(1 - 0,914) = 0,43$ máquinas.

b) El número medio de máquinas que están funcionando en este momento y que tendrán que ser atendidas próximamente: $J = NF(1 - X) = 5(0,914)(1 - 0,127) = 3,98$ máquinas.

c) El tiempo medio de ociosidad (espera + servicio): $TO = W + T = [L(T + U)/(N - L)] + T = [0,43(63)/(5 - 0,43)] + 8 = 13,92$ minutos.

d) La probabilidad de que una máquina no tenga que esperar para ser atendida por el operario: $1 - D = 1 - 0,489 = 0,511$.

e) La conveniencia de asignar un operario más, teniendo en cuenta que su salario por hora es de 1.500 pesetas y el coste del tiempo ocioso de las máquinas es de 2.400 pesetas por hora (la cooperativa opera bajo el principio de la minimización de costes). Calcularemos ahora el coste de la ociosidad de máquinas bajo los supuestos de 1 y 2 operarios, así como el coste salarial de estas opciones para determinar la mejor opción a adoptar:

M	$N - J$	$(N - J)$ (pesetas)	Coste salarial	Coste total
1	1,02	(1,02 · 2.400) = 2.448	1.500	3.948
2	0,933	(0,933 · 2.400 = 2.239,2	3.000	5.239,2

Como puede observarse, el coste aumenta con la contratación del segundo operario, por lo que, bajo este criterio, esta opción debe ser rechazada.

I.3.3. Taxonomía de los modelos de colas

Se suele emplear la taxonomía basada en la notación A/B/s, donde A hace referencia a la función de distribución de las llegadas, B a la tasa de servicio, y s al número de servidores o canales. Puesto que pueden darse diferentes funciones de distribución, se emplea la siguiente notación para referirse a ellas:

M: exponencial.
D: determinística.
G: cualquier distribución de la tasa de servicios.
GI: cualquier distribución de la tasa de llegadas de trabajos.

Así, un problema $GI/M/1$ será un problema de líneas de espera con un servidor, una tasa de llegada de trabajos que puede adoptar cualquier función de distribución de probabilidad y una tasa de servicios distribuida exponencialmente.

I.3.4. Análisis económico de los sistemas de colas

Como ya se comentó en el Apartado I.3.1, los parámetros de costes a considerar en un problema de colas para un único canal y un único trabajo son el coste por hora de la capacidad del sistema a utilizar, C_s, y el coste por hora de la espera de los trabajos en el sistema C_w. A partir de estos parámetros es posible calcular el coste asociado a la utilización de un número dado de canales o servidores. Así, si el coste por hora de una máquina es conocido y se pretenden poner en funcionamiento tres de estas máquinas durante un tiempo de ocho horas, el coste de la capacidad del sistema sería $CS = 3(C_s)8$. Para determinar el coste de la espera durante el mismo período de tiempo habrá que comenzar por determinar el número de trabajos esperados cuando se opera con tres máquinas: $CW = 8L_q(3)C_w$.

El coste total vendrá dado por la suma de ambos, que se puede expresar en función del número de servidores: $CT = (C_s)s + C_w(L_q(s))$. A partir de esa expresión se intentará determinar el número de canales o servidores que permitirá conseguir el mínimo coste total. En este caso, no es posible encontrar matemáticamente un mínimo para CT en función de s. Por ello, lo que suele hacerse en la práctica es ir asignando diferentes valores a s a fin de obtener un mínimo para los costes totales. Existen en el mercado algunas aplicaciones, como el módulo GPSS de IBM, que permiten efectuar simulaciones a fin de encontrar dicho valor.

Puede darse el caso de que no sea fácil estimar los costes mencionados (especialmente C_w) y que se opte por confrontar el nivel de servicio deseado con la utilización del sistema. Ello puede hacerse a través de la curva de la Figura I.7 (Schroeder, 1993), que muestra cómo al aumentar la utilización del sistema (ρ), se incrementa enormemente el tiempo de espera (L_q) y, con ello, disminuye el nivel de servicio. Una curva análoga (Suri y Treville, 1993) muestra la relación entre ρ y el tiempo de suministro o de entrega, *TS*, y el trabajo en curso, Tc. (Figura I.8). El paralelismo es evidente, lo cual es lógico dada la estrecha relación entre L_q, *TS* y *Tc*. Todos estos aspectos son de sumo interés en relación con las decisiones de capacidad y la rapidez de respuesta del sistema productivo.

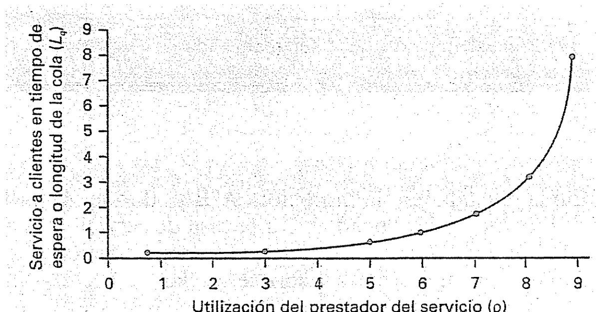


Figura I.7. Relación entre Utilización del sistema y nivel de servicio.

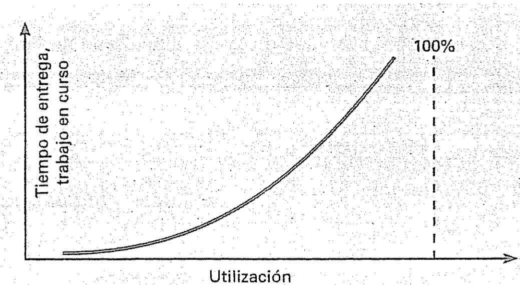


Figura I.8. Relación entre utilización del sistema y tiempos de entrega y en curso.

I.3.5. Consideraciones finales

Esta parte del Anexo se ha centrado en el diseño de sistemas de servicio y estaciones de trabajo o centros de máquinas que posibiliten la obtención de un equilibrio entre los costes de la capacidad del sistema y los costes de espera. En numerosas ocasiones es posible determinar de este modo un determinado nivel de servicio. En otras, sin embargo, la solución obtenida puede no ser viable. Este es el caso en el que existen, por ejemplo, restricciones financieras, de tiempo o de espacio, que impiden llevar a cabo la solución calculada. Si, en efecto, éste fuera el caso y no se pudiese mejorar el servicio con facilidad, es posible introducir elementos que contribuyan al entretenimiento de los clientes durante el tiempo de espera (cuando se trata de un servicio). Algunas entidades de este tipo han sacado provecho de estos tiempos de espera colocando sus productos en paralelo con las colas, a fin de que los clientes añadan a su «cesta de la compra» estos artículos, como es, por ejemplo, el caso de los supermercados.

Algunos problemas de colas son más complejos de lo que en su primer momento podría pensarse. Nosotros nos hemos referido exclusivamente a situaciones o problemas independientes, esto es, de una sola etapa o fase. Sin embargo, en la práctica manufacturera y de servicios, los problemas de colas de varias fases (secuenciales o en paralelo) suelen ser bastante comunes. En algunos de estos casos, las salidas de una cola se convierten en entradas de la siguiente, lo que restringe y dificulta la utilización de las expresiones simples utilizadas en este Anexo. Estas fórmulas se pueden utilizar cuando las características de los problemas no se corresponden con las recogidas en el Cuadro I.2 o cuando el sistema no se encuentra en un estado estacionario, esto es, el sistema no ha operado durante un período de tiempo lo suficientemente largo como para minimizar los efectos del arranque del proceso. Los modelos que se han recogido son los más utilizados, pero representan una parte muy restringida de los desarrollados por la Investigación Operativa, como, por ejemplo, aquellos en los que la tasa de servicio depende del número de trabajos en el sistema, o la tasa de llegada no se distribuye según la función de Poisson. La solución a estos problemas complejos suele encontrarse en la aplicación de la simulación. El Ejemplo I.10 ilustra un problema de colas en el que se ha aplicado un sistema sencillo de simulación «manual» y se establecen los pasos a seguir para llegar a una solución.

EJEMPLO I.10. Aplicación de la simulación para los problemas de colas[11]

En una empresa del sector de máquinas herramientas, los pedidos de materia prima recibidos son enviados desde el departamento de recepción al de inspección para que se efectúe el control de calidad. En recepción trabajan dos personas, que son las que envían las materias primas a las 10 personas que se encargan de la inspección. Una de las directivas del Departamento de Operaciones estima que la supervisión es ineficiente, fundamentalmente porque cree que 10 personas son pocas para atender a una población prácticamente infinita de materias primas. El conocimiento de la Teoría de Colas lleva asimismo a suponer que ni la tasa de llegadas de materias primas sigue una función Poisson, ni la de prestación de servicios una exponencial negativa. Para buscar una solución, se ha decidido acudir a la simulación. Los pasos a emprender serían los siguientes:

- Se fija un horizonte en el que se observan, durante un determinado período de tiempo seleccionado aleatoriamente, los tiempos de llegada y de prestación del servicio (entrada de materias primas y operaciones de inspección, respectivamente).
- Las observaciones obtenidas se ordenan en intervalos de tiempo para los que se registran las tasas de llegada y de servicios prestados.
- Los datos recogidos se tabulan a fin de conocer las distribuciones de frecuencias de los diferentes tiempos de llegada y prestación de servicios, así como los tiempos medios de llegada y de prestación de servicios.
- Se emplea algún modelo de simulación[12] para calcular, en primer lugar, las llegadas y el tiempo de servicio y, en segundo lugar, la forma de lograr el mejor ajuste entre ambas. Para ello, debe comenzarse por establecer una disciplina de cola, como la de atender primero a la primera llegada que entre en la sección de inspección (la comparación entre las diferentes tasas permitirá estimar la utilización del sistema, el tiempo de espera en la línea, el número medio de trabajos en línea, etc.).
- Cuando sea posible, el resultado obtenido puede ser comparado con el que resultaría de aplicar alguna de las fórmulas recogidas en el Cuadro I.4, sin olvidar, claro está, que las condiciones del sistema difieren y, por tanto, la solución «matemática» no tiene por qué tomarse como óptima, sino como un simple elemento para el contraste.

[11] Este problema está desarrollado en Levin y otros (1992, págs. 728 a 737).

[12] El método de MonteCarlo, recogido en el Capítulo 13, es aplicado con frecuencia. También es cada vez más usual acudir al empleo de hojas de cálculo como Lotus, Quattro, Excel y SuperCalc.

REFERENCIAS Y BIBLIOGRAFIA

COOPER, R. B.: «Introduction to queuing theory», Elsevier-North-Holland, 1981.

DILWORTH, J. B.: «Operations management», McGraw-Hill, 1992.

EPPEN, G. D.; GOULD, F. J., y SCHMIDT, C. P.: «Introductory management science», Prentice Hall, 1991.

KRAJEWSKI, L. J., y RITZMAN, L. P.: «Operations management», Addison-Wesley, 1990.

LARRAÑETA J.: «Programación lineal y grafos», Universidad de Sevilla, 1977.

LEVIN, R. I.; RUBIN, D. S.; STINSON, J. P., y GARDNER, E. S.: «Quantitative approches to management», McGraw-Hill, 1991.

MACHUCA, J. A. D., DURBAN, S., y MARTÍN, E.: «El subsistema producivo de la empresa». Pirámide, 1990.

MACHUCA, J. A. D., y RUIZ MARTÍNEZ, R.: «Consideraciones críticas acerca de la interpretación económica del problema dual», *Rev. Española de Financiación y Contabilidad*, vol. XI, n.° 38, 1982.

MCCLAIN, J. O.; THOMAS, L. J., y MAZZOLA, J. B.: «Operations management», Prentice Hall, 1992.

SCHONBERGER, R. J., y KNOD, E. M.: «Operations management», Irwin, 1991.

SCHROEDER, R. G.: «Operations management», McGraw-Hill, 1993.

STEVENSON, W. J.: «Production/Operations Management», Irwin, 1990.

SURI, R.: «Lead Times Reduction Through Rapid Modelling», Manufacturing Systems, Hitchcok Publishing G., 1989.

SURI, R.; DE TREVILLE, S.: «Rapid modelling: The use of queing models to support time-based competitive manufacturing», en *Operations research in production planning and control*, de: Fandel G.; Guiledge, T., y Jones, A. (Eds.), Springer Verlag, 1993.

WALLER, A. W.: «A queing network model for field service support systems», *Omega*, vol. 22, n.° 1, 1994.

PARTE SEGUNDA

LA CALIDAD: SU GESTION Y CONTROL

CAPITULO 11

LA CALIDAD Y SU GESTION

11.1. INTRODUCCION A LA CALIDAD

Estamos viviendo en una época de cambio. Si miramos todo lo que está sucediendo a nuestro alrededor y analizamos lo que vemos, nos podremos dar cuenta de que estamos inmersos en una variación continua de nuestro entorno.

Dicho entorno se transforma en todos sus aspectos y a una velocidad vertiginosa, cada vez más rápida. Sirvan de ejemplo los cambios políticos, no hablemos ya de los regímenes gobernantes, sino, por ejemplo, de los propios países, de los cuales más de la mitad no existían como tales hace 50 años. Como podemos suponer fácilmente, este aspecto ha generado grandes cambios en el mercado. Otro aspecto importante es el tremendo envejecimiento del mismo; para hacernos una idea de su magnitud, pensemos que el número de personas que ahora tienen más de 75 años son más de la mitad de los que han superado esa edad desde que el hombre apareció en la Tierra.

Con todo lo expuesto anteriormente, y siendo defensores de la idea de que la empresa es un sistema abierto (ver J. A. D. Machuca y otros, 1994, Capítulo 1), somos conscientes de que ésta ha tenido que evolucionar al mismo ritmo que el entorno, para así poder sobrevivir en este clima de cambio permanente. Esto ha sido posible ya que, como se muestra gráficamente en la Figura 11.1, la empresa está en constante interrelación con el mercado del saber y la innovación, el cual, como todos, ha evolucionado; quizá sea su transformación la responsable de la mayoría de los cambios producidos, ya que más del 75 por 100 de los científicos que han existido viven actualmente, por lo que es lógico que esta «concentración de ciencia» haya hecho que la empresa actual sea capaz de responder a las metamorfosis que se han ido produciendo a su alrededor.

11.2. LA CALIDAD

Cierto es que el mundo empresarial se ha desarrollado de una forma impresionante en los últimos tiempos, provocando una gran variedad y tipos de ofertas capaces de satisfacer cualquier demanda que se genere. Esto, unido a la crisis actual, conlleva a un sistema competitivo en el que variables tradicionales, típicamente económicas, como el precio, han pasado a un segundo término, debido a que, por su tradicional importancia, han sido ya tenidas en cuenta por todas las empresas, ajustándolas al máximo y disminuyendo, con ello, las posibilidades de actuar a través de las mismas. El consumidor se encuentra en un estado ideal para

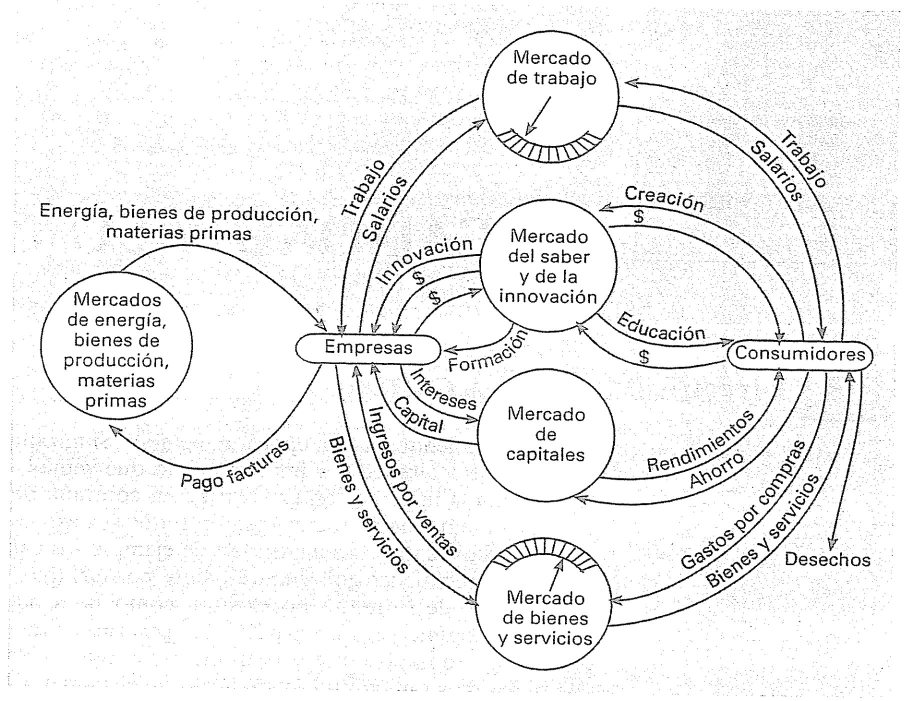


Figura 11.1. La empresa en la economía de mercado (J. A. D. Machuca y otros, 1994, Capítulo 1).

la elección del producto o servicio, decidiéndose por aquel que más le satisface para cubrir sus necesidades, teniendo en cuenta todas las características del mismo. El cliente optará por aquel que, dentro del rango de precios que se haya marcado, resulte más idóneo para su uso. Ese es precisamente el **concepto de calidad** que tiene el **consumidor, la adecuación e idoneidad al uso**. Pero, desde nuestro punto de vista, el de la empresa, esa definición de calidad es insuficiente; hará falta algo más tangible para así poder crearla, desarrollarla y, cómo no, controlarla.

Si consultamos las definiciones que ofrecen los autores especializados en calidad, nos encontraremos con una gran variedad. Nosotros hemos optado por la recomendada por la Sociedad Americana de Control de Calidad (*American Society of Quality Control, A. S. Q. C.*) que la define como *conjunto de características de un producto, proceso o servicio, que le confieren su aptitud para satisfacer las necesidades del usuario*. Esta elección ha sido debida a que el resto de las definiciones se basan, generalmente, en la «satisfacción generada al usuario», variable más compleja de estimar, ya que entra de lleno en el mundo de la subjetividad y, por tanto, será más difícil de poder medir y controlar.

Así pues, podremos medir la calidad de nuestro producto o servicio comparando las características que realmente posee con las que, teóricamente, nos han solicitado. Esto nos va a llevar, como veremos a continuación, cuando hablemos del ciclo generador de calidad, a definir varios tipos de calidades, dependiendo de las fases en que dividamos la vida del producto o servicio, desde su demanda hasta su utilización por parte del consumidor final.

11.3. CICLO GENERADOR DE CALIDAD

Generalmente tenemos la idea de que los productos[1] artesanos son los que más nos agradan; esto tiene una explicación muy sencilla si pensamos en la definición que hemos dado de calidad en el apartado anterior.

Si pensamos, por ejemplo, en hacernos un traje a la medida, tendremos que tener una idea de cómo o para qué queremos dicho traje y, además, conocer o tener referencias de un buen sastre. Una vez que nos ponemos en contacto con éste, le exponemos nuestra «necesidad», indicándole, quizá, alguna sugerencia acerca de los detalles que nos gustaría que tuviese dicho traje. Basándose en su experiencia y en el conocimiento de la moda, él nos dará a elegir entre las telas más idóneas para la confección del mismo, así como algunos consejos sobre características que debe tener el traje, que nosotros, por desconocimiento del producto, no sabemos.

Con esta información, y con nuestras medidas, hará un prototipo que nos probaremos para corregir *in situ* cualquier posible defecto que éste tenga (algo que no nos guste); una vez superada esta fase, se pasará a la terminación del producto, que nos volveremos a probar antes de retirarlo. Así pues, teóricamente, hemos adquirido un producto que satisface al 100 por 100 nuestras necesidades.

Será un producto de alta calidad, ya que como puede verse en la Figura 11.2, no ha habido ningún tipo de interferencias entre la transmisión de las características que debía tener el producto y la recepción de las mismas por parte del que lo iba a realizar. Además, antes de dar por finalizado dicho producto, hubo una o más pruebas para ir adecuando el traje a nuestra entera satisfacción hasta darlo por terminado. Por ello, podremos suponer que coinciden en su totalidad las características que queríamos que tuviese el producto con las que éste posee.

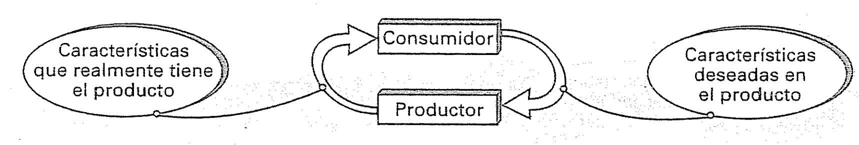


Figura 11.2. Ciclo artesanal.

Sin embargo, generalmente, una de las características críticas en los productos es el precio, y por no poder pagar lo que vale un traje hecho a medida, son muchos los que irán a comprarlo en el mercado del *prêt-à-porter*, es decir, a elegir un traje ya confeccionado. Como es de suponer, en este tipo de mercado no se tiene relación directa con el ejecutor del traje, sino que un intermediario intentará servirnos el producto que más se adecúe a nuestras necesidades. De ahí que se pueda deducir que, en el sentido definido en el Apartado 2, dicho traje no será de la misma «calidad» que el del ejemplo anterior, y ello simplemente porque, como hemos dicho antes, es el cliente el que tendrá que adecuarse a lo que ya exista en ese mercado.

[1] Aunque a partir de ahora nos refiramos solamente a los productos, todo lo que se expone es también aplicable a los servicios.

Otro ejemplo de cómo se puede ir deteriorando la calidad de un producto, a medida que vamos introduciendo intermediarios, o mejor dicho, eslabones en la cadena que lo va a generar, sería el de la construcción de una casa. Si queremos construirnos nuestra casa, nos pondremos en contacto con un arquitecto, al que contaremos cómo queremos que sea ésta. Este profesional, teniendo en cuenta nuestras indicaciones, llevará a cabo un proyecto que intentará abarcar todas las características que le hemos solicitado. Como todos sabemos, este proyecto es un documento donde se especifican todas y cada una de las características del producto, la casa en este caso, y cómo se tiene que llevar a cabo su realización. Dicha realización será función de un constructor, que tendrá únicamente como fuente de información el proyecto mencionado y la supervisión constante del responsable del mismo, el arquitecto.

Como se puede apreciar en la Figura 11.3, en este caso hay tres grupos de características diferentes: las que desea el consumidor, las del proyecto y las que tiene la casa ya construida, por lo que basándonos en la definición que dimos de la calidad podremos definir tres calidades diferentes:

- **Calidad teórica**, que será aquella que mida la calidad del diseño, comparando las características solicitadas por el usuario y las plasmadas en el proyecto.
- **Calidad técnica**, que contrastará las características reales del producto con las que venían definidas en el proyecto.
- **Calidad usuario**, que es la que realmente importa al consumidor, ya que comparará lo que le han dado con respecto a lo que pidió.

Todo lo expuesto anteriormente nos ha servido sólo de acercamiento al problema que hoy en día tienen nuestras empresas, ya que raramente el consumidor está tan cerca del diseño y de la fabricación del producto, con lo que, extrapolando la filosofía que hemos seguido hasta ahora, podremos suponer lo difícil que puede ser dar al consumidor exactamente lo que quiere.

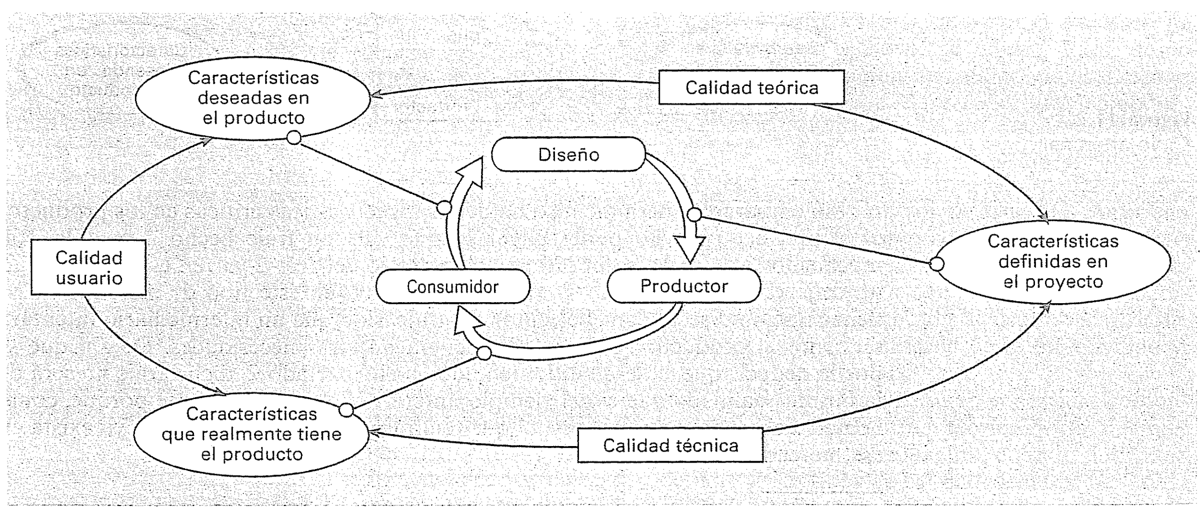


Figura 11.3. Ciclo con un intermediario.

Debido quizá a la lejanía geográfica entre los usuarios de los productos y a las características de los sistemas de producción existentes hoy en día, tendremos que incrementar, al menos en una fase más, el circuito de generación del producto; éste sería el de almacenaje y transporte, con lo que la representación gráfica quedaría como se indica en la Figura 11.4.

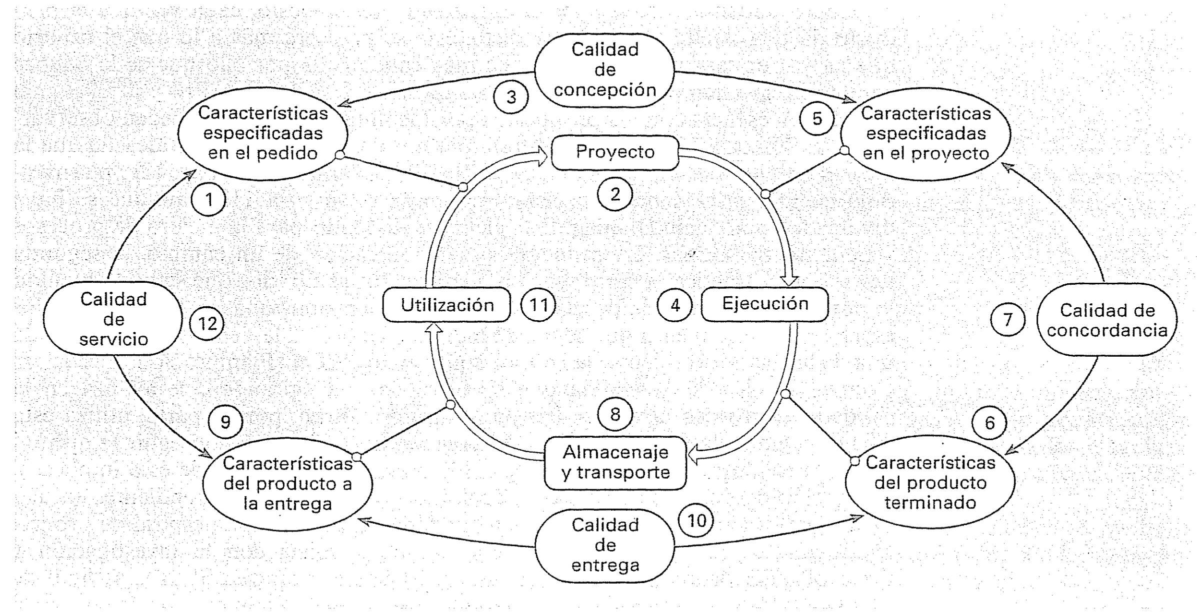


Figura 11.4. Ciclo generador de calidad (basado en Fuente González, 1980, pág. 214).

En dicha figura podemos apreciar que, a partir de unas características, especificadas por el cliente en su pedido (1), se ha realizado el proyecto (2); igual que en el caso anterior, ello da lugar a la calidad teórica, que ahora se denomina **calidad de concepción** (3), ya que medirá la capacidad de concebir el producto demandado. El siguiente paso, como es lógico, será el de ejecutar el proyecto (4) y obtener así el producto terminado, pudiendo comparar las características de éste (6) con las especificadas en el proyecto (5); antes hemos llamado calidad técnica a la relacionada con este aspecto, hoy se le denomina **calidad de concordancia**[2] (7).

El paso siguiente es poner el producto en manos del consumidor, para lo que generalmente será necesario un almacenaje y un transporte (8), los cuales podrían alterar en algún aspecto las características del producto terminado (6); por ello hay que definir otra calidad que mida estos posibles cambios, la cual se denomina **calidad de entrega** (10). Por tanto, lo que el usuario tendrá en sus manos será ese producto una vez transportado (9), el cual comparará con lo que solicitó (1), generándose aquí la que vamos a denominar **calidad de servicio** (12). Las posibles

[2] Estos cambios de denominación sufridos por las calidades teóricas y técnicas se han debido a la profundización en el estudio de la generación de la calidad, pero aún se puede oír hablar de ellas en algunas empresas. Por esa razón se ha preferido exponer en esta obra sus dos apelativos.

divergencias entre las características deseadas y las del producto que le entregan, podrán provocar que se reinicie el ciclo, entrando otra vez en las sucesivas fases de proyecto, ejecución, almacenaje y transporte para, finalmente, terminar en la utilización. Posteriormente pueden generarse nuevas necesidades para el producto en cuestión, que el consumidor pediría al productor, volviendo a comenzar el proceso.

Como podemos deducir de lo anteriormente expuesto, cada vez que el producto da una vuelta más por ese ciclo, éste se parecerá más a lo que el usuario quería, y, por tanto, tendrá cada vez más calidad. Es por ello que se le conoce como **ciclo generador de calidad** (Fuente González, 1980, págs. 214 y 215), el cual coincide en esencia con los propuestos por Deming y Juran, que pueden observarse en las Figuras 11.5 y 11.6. Deming presentó a los japoneses la idea de que la mejora continua exige una modalidad circular (Walton, 1992, pág. 12) , plasmándolo en lo que él denominó **ciclo de Shewhart**[3] (Figura 11.5), aunque se haya divulgado como **ciclo Deming**. Este ciclo fue diseñado para la mejora de procesos y tiene cuatro etapas. La primera es la planificación de un cambio, la segunda llevarlo a la práctica, a continuación, verificar los resultados que se han obtenido y, por último, tomar las decisiones que se estimen oportunas si éstos no son los esperados o si se piensa que se puede mejorar. Debido a la denominación de cada una de las fases, también se le conoce como ciclo PECA (Planificación, Ejecución, Control, Acción)[4]. A medida que esta «rueda» va «girando», se avanza en la calidad del proceso al que se le está aplicando. Juran, por su parte, utiliza esta idea al estudiar la función de calidad como un camino para conseguir la aptitud para el uso (Juran y otros, 1990, pág. 13). Afirma que el logro de ésta implica la realización de un cierto número de acciones o actividades independientes en una progresión lógica, formando dichas actividades la denominada espiral de progreso (Figura 11.6). Una vuelta de esta espiral se inicia con la investigación y desarrollo del producto para crear una mejora en la aptitud al uso. Al final de esta vuelta, la experiencia de uso crea una nueva idea, que inicia otra vuelta de la espiral para una mejora ulterior.

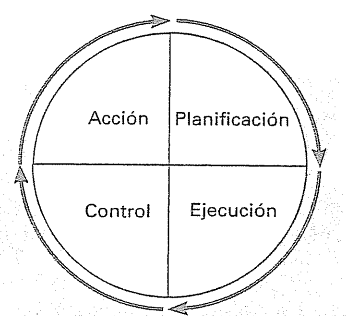


Figura 11.5. Ciclo de Shewhart.

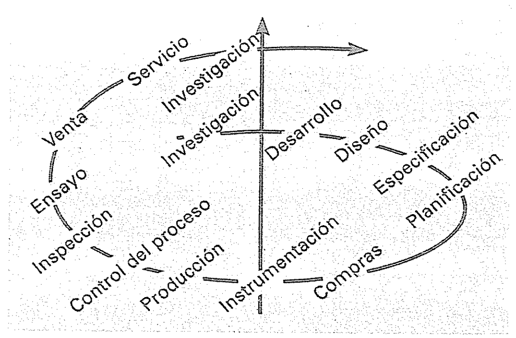


Figura 11.6. La espiral del progreso en la calidad (Juran, 1990, pág 13).

[3] En homenaje a Walter Shewhart, pionero del control estadístico de calidad. Ver Apartado 12.5.7.

[4] Por la misma razón, también se le conoce como PHVA (Planificar, Hacer, Verificar, Actuar), PHRA (Planificar, Hacer, Revisar, Actuar), etc.

Sin embargo, como indica Drucker (1991), los aspectos técnicos de la mejora continua no explican por sí solos el enorme incremento obtenido paralelamente en la productividad. Así, empresas japonesas, como Toyota, Honda y Nissan, consiguen un número de coches por trabajador dos o tres veces superior al de plantas comparables en EE. UU. y Europa. La mayor parte de esa diferencia procede de los cambios que el control estadístico de calidad (ver Capítulo 12) ha traído consigo en el elemento humano de la firma.

11.4. ELEMENTOS DE LOS QUE DEPENDE LA CALIDAD

Una vez conocidas las distintas fases en las que se va a generar la calidad del producto, será conveniente analizar los elementos de los que, según la mayoría de los autores, depende la calidad del mismo. Estos son cinco:

- Los materiales.
- Las máquinas.
- Los métodos.
- Los hombres.
- La organización.

Con respecto a los **materiales**, no merece la pena hacer ningún comentario, ya que es obvio que habrá que utilizar los adecuados para obtener el producto con la calidad requerida, al igual que sucede con el siguiente elemento, **las máquinas**. Al tratar estos dos elementos, un error frecuente en el que se suele caer es utilizar los mejores posibles para obtener un producto de «alta calidad». Esto es debido a que *se suele confundir el concepto de calidad con el de bondad*. Debemos recordar siempre que el posible usuario tiene una idea de lo que quiere, teniendo en cuenta el precio que va a pagar por él; sería pues, un despilfarro (un incremento de costes inútil) utilizar tecnología punta, generalmente cara, para la obtención de un producto que se pueda conseguir con otro tipo de tecnología, más universal y, seguramente, más barata.

El tercer punto, **los métodos** a emplear, deben estar definidos en el proyecto técnico junto a los dos elementos anteriores, con los cuales están íntimamente ligados. El *estudio de métodos* es algo que se ha venido relegando a un segundo plano a medida que ha ido avanzando la tecnología productiva, realizándose éstos en dependencia, casi exclusiva, de las máquinas a utilizar. Son muchos los factores a analizar que influyen en los métodos (por ejemplo, el hombre, el puesto de trabajo, la ruta del producto, etc.) y sería muy conveniente tenerlos en cuenta, ya que influirán en gran medida sobre la productividad y sobre la calidad. Su realización suele ser muy barata si comparamos su coste con los resultados que potencialmente se pueden obtener a partir del mismo[5].

Al abordar el cuarto elemento, **el hombre**, estamos llegando, quizá, a la piedra angular para conseguir la calidad dentro de la empresa. El factor humano debe estar dispuesto a trabajar para la calidad, para lo cual es absolutamente necesaria una educación en este campo; debe hacérsele consciente de la importancia que tiene la misma para la empresa y de que aquélla depende en gran parte de él (ver Apartados 12.3 y 12.4). Esto ha sido, según casi todos los autores, la base del éxito de Japón (ver Capítulo 7); de hecho, en el discurso que dio el emperador Hiro

[5] Para una profundización en el estudio de métodos, recomendamos la lectura de J. A. D. Machuca y otros (1994, Capítulo 6).

Hito al pueblo japonés, para comunicarles su rendición en la Segunda Guerra Mundial, les dijo «... *si queremos levantar el país tenemos que trabajar para la calidad...*». Es, pues, necesario invertir en la formación del personal; de hecho, en países muy industrializados, como puede ser el caso de Estados Unidos, esto es un gasto amortizable y significa un incremento del valor de la empresa.

Por último, queda hablar de la **organización,** la cual debe ser capaz de dar la importancia necesaria a todos los elementos anteriores y de eliminar los estrangulamientos y puntos débiles que se produzcan en nuestra cadena productiva.

El nivel de calidad dependerá, como se ha expuesto en los párrafos anteriores, de cada uno de estos elementos; lo que hará necesario un estudio a fondo de los mismos para conseguir un determinado nivel en la calidad de los productos. Dicha elección será una decisión estratégica de la dirección de la empresa (ver J. A. D. Machuca y otros, 1994, Capítulo 3), la cual se comentará en el apartado siguiente.

11.5. NIVEL OPTIMO DE CALIDAD

Aunque no sea totalmente cierta la famosa curva de la demanda frente al precio, ya que se tendrían que mantener constantes todos los demás parámetros económicos, nos vamos a referir a ella en este apartado, ya que su comportamiento real es, por lo general, parecido al teórico que en ella se plasma. Es lógico pensar que, si bajamos el precio de un determinado producto, su demanda aumentará de una forma análoga a la mostrada en la Figura 11.7. Sin embargo, como dijimos en el Apartado 11.2, el precio del producto suele estar actualmente muy ajustado debido a la gran competencia existente, con lo que resulta más difícil utilizar esta variable para incrementar la demanda de nuestro producto. Parece más plausible hacer que éste sea preferido por el consumidor frente a los de la competencia, dándole por el mismo precio lo que realmente él quiere, es decir, aumentando la calidad (Figura 11.8).

Es decir, si manteniendo el precio, p, del producto se aumenta la calidad del mismo, deberá producirse, lógicamente, un aumento de la demanda; pasaríamos, pues, de un nivel, $d1$, a otro superior, $d2$, debido a que la curva de demanda habrá

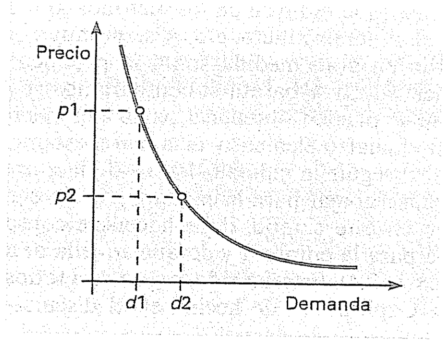


Figura 11.7. Función precio (pi)/ demanda (di).

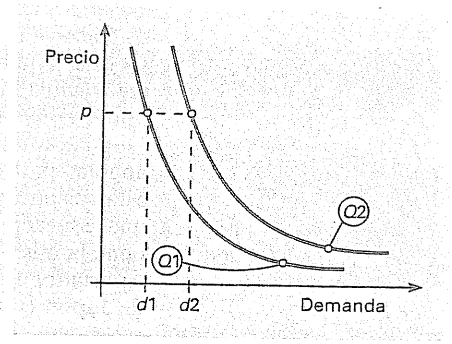


Figura 11.8. Sensibilidad de la demanda a una variación de calidad (Qi).

cambiado al pasar la calidad de Q1 a un valor mayor, Q2. Dicho de otra forma, a medida que vayamos aumentando la calidad de nuestro producto, la curva de demanda se irá desplazando hacia la derecha, por lo que, fácilmente, podemos dejarnos llevar y extrapolar dicha idea, intentando fabricar al nivel de calidad más alto que permita nuestra empresa. Sin embargo, si intentamos llevar a cabo esta política de un solo golpe, la empresa podría incluso obtener pérdidas, ya que paralelamente a los correspondientes incrementos de ingresos se habrá producido una variación en los costes, la cual habrá que considerar. Para discutir estos aspectos nos basaremos en la Figura 11.9.

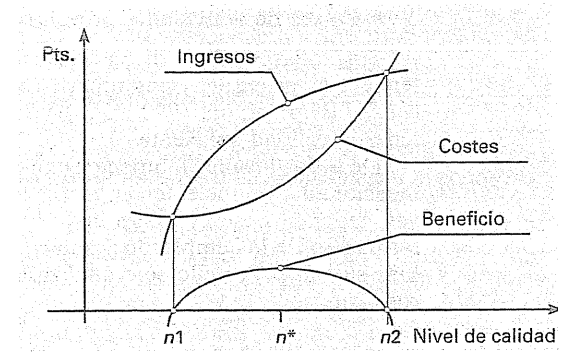


Figura 11.9. Curva de beneficios.

Como puede apreciarse en la mencionada figura, a medida que vamos aumentando el nivel de calidad de nuestro producto, los costes se van incrementando, siendo su pendiente cada vez mayor. Los ingresos también aumentan, pero de forma diferente: su pendiente va disminuyendo, ya que el consumidor no estará dispuesto a pagar más por una determinada característica del producto, especialmente si la mejora supera sus necesidades. Si nos fijamos en el beneficio que se ha obtenido como diferencia entre los ingresos y los costes, podemos ver que definen claramente unas determinadas zonas de posible fabricación sin pérdidas.

Es obvio que no interesará fabricar con un nivel de calidad inferior a $n1$, ya que en ese nivel el producto es tan malo que no provocará los ingresos necesarios para sufragar los costes generados. Lo mismo sucede, pero por razones totalmente opuestas, si fabricamos a un nivel superior a $n2$, ya que, por lo indicado en el párrafo anterior, el producto no será capaz de generar los ingresos suficientes, que también resultarán inferiores a los costes. Así pues, de acuerdo con la Figura 11.9, se tendería a fabricar a un nivel **n***, que sería el hipotético **nivel óptimo de calidad,** donde se encontraría el «máximo» beneficio (si éste pudiera encontrarse). Esta decisión sería más fácil en el caso de que la competencia no existiera, pero ésta tenderá a hacer lo mismo. Ello hace pensar que podría ser más conveniente sacrificar parte de los beneficios y elegir un nivel de calidad comprendido entre n^* y $n2$.

Antes de terminar conviene resaltar que las curvas de costes de la Figura 11.9 son teóricas y que, en la práctica, pueden conseguirse incrementos de calidad sin que los costes para llegar a ello sean excesivos (ver Capítulo 6). Por otra parte, como hemos visto a lo largo de la presente obra, la mejor calidad en componentes y productos finales trae consigo el decremento de otras partidas de costes en la empresa, tales como las procedentes de inventarios de seguridad, reprocesamientos, reprogramación, etc. Por tanto, la determinación de la nueva curva de costes

de la firma debe contemplar conjuntamente todos estos aspectos y no únicamente los que hacen falta para incrementar la calidad.

11.6. COSTES DE LA CALIDAD

La mayoría de los autores que han escrito sobre este tema suelen clasificar estos costes en tres grupos:

- Costes generados por artículos defectuosos.
- Costes generados por las inspecciones.
- Costes de actividades preventivas.

Sin embargo, al ver dicha clasificación, es fácil comprender por qué las últimas tendencias proponen denominarlos más bien *costes de la no calidad o de la mala calidad* (Harrington, 1990, pág. 1 y ss.), ya que realmente están generados por no tener la calidad suficiente.

De todas formas, tampoco estamos totalmente de acuerdo con la clasificación mencionada, ya que el tercer grupo, los costes generados por actividades preventivas, suponen una verdadera inversión. Dichas actividades (como, por ejemplo, la formación de los empleados) aumentarán la productividad de la empresa y también su valor. Por ello sólo analizaremos como costes indeseables los dos primeros grupos.

11.6.1. Costes generados por los artículos defectuosos

Podemos dividir los productos defectuosos en dos tipos (ver Tabla 11.1), los que identificamos como defectuosos dentro de la empresa y aquellos otros que no identificamos como tales, saliendo, por tanto, al mercado para ser vendidos. Comentamos ambos seguidamente.

11.6.1.1. *Productos defectuosos identificados*

Los que pertenecen a este grupo van a generar costes distintos, dependiendo de lo que se haga con ellos. Según el tipo de producto, existen tres posibles salidas:

- Rechazarlos.
- Utilizarlos como productos «B».
- Reelaborarlos.

En el primer caso, **rechazarlos**, los costes que se generan serán los derivados de la elaboración, es decir, materia prima utilizada, mano de obra, gastos generales, etcétera, de los que se deducirían, en su caso, los posibles ingresos obtenidos por la venta de los mismos como inservibles o chatarra. Este sería el caso de productos de reelaboración imposible (como por ejemplo, la mayoría de los productos alimenticios) o bien de aquellos otros en los que ésta fuese más costosa que su fabricación y tampoco se pudiesen vender como artículos de menor calidad (como podría ser el caso de las hojas de afeitar).

Si el consumidor estuviera dispuesto a aceptar ese producto de inferior calidad, pero pagando un precio más bajo, estaríamos en la segunda opción, la de **utilizarlos como productos «B»** o, mejor dicho, la de introducirlos en un mercado «B», donde dicho consumidor es consciente del tipo de producto que está adquiriendo (como ocurre, por ejemplo, en los mercados callejeros de ropa). El coste que ello supondría sería, por tanto, las pérdida de beneficio que tendríamos que

soportar, que sería igual a la diferencia entre los precios de venta del producto bueno y del defectuoso.

El último caso, **reelaboración**, es el de casi todos los productos fruto de un montaje, como coches, televisores, etc. Si se descubre el posible defecto que pueda tener el producto, éste sería reparado, quitándole las piezas defectuosas y cambiándolas por nuevas. El coste que esto conllevaría sería el provocado por dicha reparación (mano de obra, piezas sustituidas, etc.).

Todos los costes mencionados son los que se denominan **tangibles** y su determinación resulta fácil. Pero existe otro grupo de costes, denominados **intangibles**, común para todas las opciones que hemos comentado, que son muy difíciles de calcular (generalmente sólo podremos realizar una evaluación bastante subjetiva). Ejemplos de este grupo serían los provocados por: pérdidas en la producción, obstáculos que se generan en la programación de la producción, insatisfacción de los clientes por eventuales retrasos en la entrega, descenso en la moral empresarial, etc.

11.6.1.2. *Productos defectuosos no identificados y vendidos*

Dado que los productos defectuosos de este grupo saldrán al mercado, puede ser que suframos reclamaciones de algunos clientes. Esto nos llevará a asumir un coste de servicio de asistencia, generalmente compuesto por personal especializado (y, en general bastante caro), reparaciones, sustituciones de productos o piezas del mismo, desplazamientos del personal, etc. En caso de que no exista ninguna reclamación no habrá que sumar, como es lógico, ningún coste adicional. Pero, en ambos casos, existirá un coste intangible verdaderamente peligroso para nuestra empresa, derivado de las repercusiones negativas sobre la opinión acerca de la calidad de nuestro producto y del buen nombre de nuestra empresa. Ello provocará a la larga una pérdida de imagen que costará muchísimo recuperar, en el caso de que tengamos oportunidad de hacerlo.

El coste por artículos defectuosos puede llegar, en algunas empresas, hasta el 20 por 100 de su cifra de ventas; una forma de disminuirlo es incrementar la

Tabla 11.1. Costes generados por los productos defectuosos (basada en Garbin e Invrea, 1979, pág. 33)

			Costes tangibles	Costes intangibles
PRODUCTOS DEFECTUOSOS	Productos defectuosos identificados	Rechazados	Coste del material, de la mano de obra y gastos generales, menos los ingresos producidos por la venta de residuos	◦ Pérdidas en la producción ◦ Obstáculos a la programación ◦ Disgusto de clientes por retrasos eventuales ◦ Moral empresarial, etc.
		Utilizados como productos «B»	Diferencia de precio entre las dos clases de productos	
		Reelaborados	Coste de las elaboraciones suplementarias	
	Productos no identificados y vendidos	Reclamados por el cliente	Coste del servicio de asistencia por inspecciones, reparaciones, etc.	◦ Mala fama para la calidad del producto y el buen nombre de la empresa. ◦ A la larga, pérdida de imagen
		No reclamados por el cliente	Ninguno	

inspección. Ahora bien, debemos ser conscientes de que esto también entraña un coste, aspecto que abordamos seguidamente.

11.6.2. Coste generado por las inspecciones

Se incluyen aquí todos los costes que se generan para conseguir el objetivo de impedir, o limitar, la salida de productos defectuosos al mercado; es decir todas las inspecciones y controles de calidad que se realicen durante las distintas fases de fabricación, cualquiera que sea el departamento que los efectúe. Estos costes se aceptan con el fin de evitar otros mayores, que se derivarían de introducir los productos defectuosos en el mercado (ver Apartado 11.6.1.2). Su evolución teórica se puede observar en la Figura 11.10. A medida que se intensifica la inspección se va consiguiendo un menor número de defectuosos y, por tanto, mejor calidad; esto es a costa de un incremento en los costes derivados de la labor de inspección, que cada vez será más difícil y, quizá, especializada, lo que hará que este coste vaya incrementando su valor casi exponencialmente.

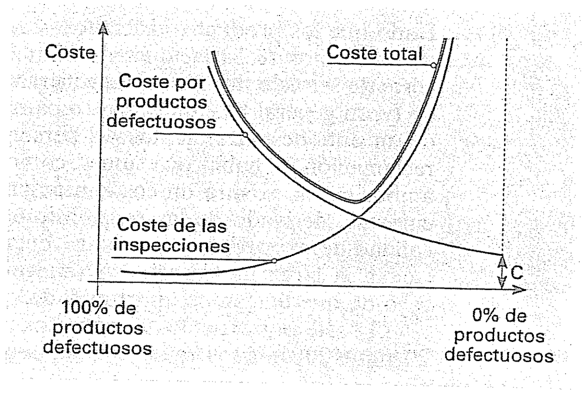


Figura 11.10. Evolución de los costes de calidad (basada en Garbin e Invrea, 1979).

Ahora bien, hay que ser cautos al aceptar esta curva teórica, pues como han demostrado las empresas japonesas (ver Capítulo 7), aproximarse al «cero defectos» no tiene por qué provocar un incremento de costes en la inspección, si se realiza ésta por el propio operario en su puesto de trabajo (ver Apartado 12.4).

De hecho, aunque la introducción del control estadístico de la calidad a dicho nivel trae consigo un incremento en el número de trabajadores por máquina, el consiguiente aumento en los costes es compensado con creces por la disminución del número de inspectores, supervisores, etc...

11.6.3. Coste total de la calidad

De acuerdo con lo expuesto hasta aquí, el **coste total** a considerar será la suma de los comentados en los apartados anteriores y representados en la Figura 11.10, en la que se puede observar que el coste por productos defectuosos no llega al cero, sino a un valor C que correspondería al coste de rechazos y/o reelaboración de los productos defectuosos identificados; para conseguir bajarlo sería necesario cambiar las características del proceso productivo (Garbin e Invrea, 1979, página 35).

Según Juran (Juran y otros, 1990, págs. 78-80), la curva del coste total se puede dividir en tres zonas (ver Figura 11.11), pudiendo deducirse, en función de nuestra posición dentro de las mismas, como nos encontramos con respecto a la calidad de nuestro producto.

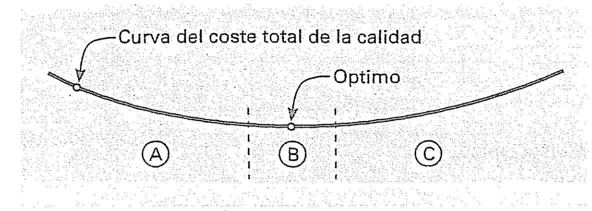


Figura 11.11. Zonas de la curva del coste total de la calidad (basada en Juran y otros, 1990, pág. 79).

La zona A, en la que los costes debidos a productos defectuosos son superiores al 70 por 100 del coste total, es la que se denomina **zona de mejora de la calidad**, donde se ha demostrado que se pueden conseguir proyectos de mejora beneficiosos. La siguiente zona, B, es la **zona de indiferencia**, donde se ha alcanzado o se está cerca del óptimo y el problema es de control: como mantener el óptimo; generalmente esta zona se caracteriza por el hecho de que la mitad de los costes de calidad son debidos a productos defectuosos. Por último, tenemos la zona C o de **perfeccionismo**, en la que los costes provocados por la inspección superan a los generados por los artículos defectuosos, por lo que habría que estudiar el coste de detectar defectos en comparación con el perjuicio que se produciría si no fuesen detectados.

Antes de continuar, debe quedar clara la relatividad de la Figura 11.10 y, por tanto, la de la Figura 11.11, ya que, como se ha comentado en apartados anteriores, el coste por artículos defectuosos es muy difícil de estimar. Así pues, debemos ser conscientes de que dichas curvas tienen únicamente un carácter orientativo.

11.7. LA CALIDAD TOTAL

Es éste otro concepto de palpitante actualidad. Se puede escuchar hablar de calidad total en cualquier campo, ya sea referido a la producción o a los servicios, aplicándose a todas las áreas y niveles de la empresa. En realidad, sólo se trata de aplicar lo que hemos venido hablando hasta ahora de la calidad en cada uno de los niveles mencionados.

En el terreno de la Dirección de Operaciones y, hablando, por ejemplo, de los productos o servicios, podría pensarse que la calidad total se conseguiría cuando éstos tuviesen exactamente las características solicitadas por el consumidor. Sin embargo, no estamos totalmente de acuerdo con dicha idea, ya que nunca debemos olvidar la utilización de la calidad como arma estratégica para mantener e incrementar nuestros mercados. Por ello hay que ofrecer algo más; para exponer esta idea vamos a utilizar la Figura 11.12.

Las distintas características, ya sean las solicitadas por el consumidor, las especificadas en el proyecto o bien las que realmente tiene el producto, han sido representadas como los puntos incluidos en los rectángulos señalados. Hemos supuesto el caso más general en el que no coincidan totalmente dichos grupos de características, dando lugar a siete zonas diferentes que pasamos a comentar.

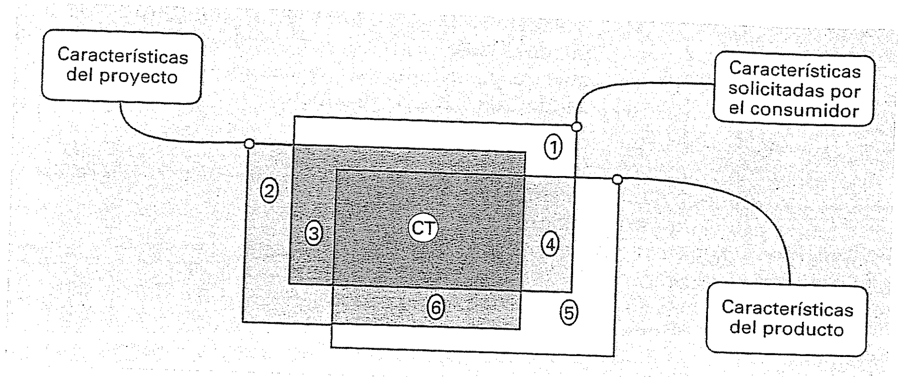


Figura 11.12. Intersección de las características para conseguir la calidad total.

Podemos ver una zona central, marcada con CT, en la que coinciden las características solicitadas, las proyectadas y las realizadas. Es ésta la que suele llamarse **zona de calidad total**, ya que coinciden al 100 por 100 dichas características. Las zonas 1 y 4 agrupan aquellas características deseadas por el consumidor pero que no se han tenido en cuenta a la hora de realizar el proyecto. Este fallo puede ser debido, bien a los técnicos de diseño que no han sabido plasmar las necesidades del consumidor, bien a los de marketing, que no han sabido captarlas del mercado o no las han transmitido convenientemente a los de diseño. Para conseguir la calidad total habría que eliminar estas zonas; cabría pensar que la zona 4 es buena, ya que se le está dando al consumidor lo que quería. En realidad, si nos fijamos en cómo ha surgido, podremos observar que las características que encierra dicha zona no han sido proyectadas, sino que se han obtenido en la fabricación de forma casual; ello hace que estén fuera de control y que puedan desaparecer de la misma forma que han aparecido. Es, por tanto, una zona más peligrosa aún que la identificada con el 1, ya que si existe y desaparece, aumentará la insatisfacción del consumidor y parece, pues, más perjudicial para la empresa que el producto pierda alguna característica deseada por el consumidor que el que ésta no haya existido desde un principio.

La zona 5 representa características del producto que están fuera del proyecto y que, además, no son deseadas por el posible usuario, con lo que no cabe ninguna duda de que esta zona también tendría que desaparecer. Lo ideal sería que lo hiciese solapándose con la zona 2, es decir, consiguiendo que las características del producto coincidiesen, en su totalidad, con las especificadas en el proyecto; se tendría así una alta calidad de concordancia, de la que hablábamos en el ciclo generador de la calidad.

Llegaríamos así a una situación como la expuesta en la Figura 11.13. Es precisamente esta situación la que creemos debe representar a la **calidad total** desde el punto de vista de producción: dar al consumidor todo lo que quiere, pero también algo más.

Basamos la idea anteriormente expuesta en dos hipótesis:

- La primera no olvidar la calidad como objetivo de nuestra empresa (ver J. A. D. Machuca y otros, 1994, Capítulo 3) y el incremento de los mercados que de ello pueden derivarse.
- La segunda que los técnicos de diseño conocen mucho mejor el producto que los consumidores potenciales, pudiendo dar a éste características que lo hagan más cómodo, fiable o seguro para el uso, yendo más allá de lo que piensa el propio usuario. De esta forma se conseguiría una clara ventaja competitiva sobre otras empresas del sector.

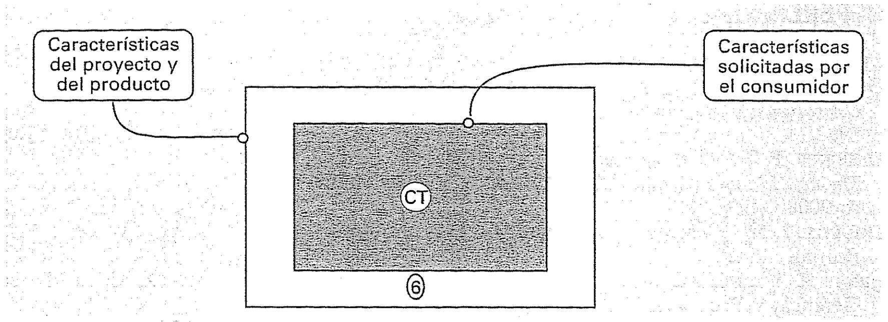


Figura 11.13. Solapamiento ideal de las características del producto para conseguir la calidad total.

11.8. CONCLUSIONES FINALES

Tradicionalmente el control de calidad ha venido funcionando mediante inspección de los productos cuando éstos eran finalizados. Frecuentemente surgían conflictos entre el personal de control de calidad, que no quería dejar pasar los productos que no consiguiesen los niveles establecidos, y el personal de fabricación que, para cumplir sus objetivos de cantidad, presionaba para que fuesen aceptados aquellos productos que, aunque defectuosos, serían aceptados por el mercado. Esto ya no es posible cuando los competidores ofrecen alta calidad a precios competitivos.

La evolución operada en los últimos años ha provocado un cambio radical de enfoque respecto a la calidad. Tanto es así que la filosofía de control de calidad total ha sobrepasado los límites de la producción propiamente dicha para introducirse y aplicarse en todas las áreas de la empresa. Cada una de ellas debe intervenir en el ciclo generador de calidad de acuerdo con los conocimientos de su campo específico, pero con una adecuada interacción y coordinación, de forma que los productos y servicios puedan ofrecerse a unos niveles de precio satisfactorios pero produciendo incluso algo más que la total satisfacción del cliente.

En el **sector industrial** son numerosos los campos en los que la calidad total se ha vuelto esencial como clave del éxito. El impacto ha sido tan fuerte que, por ejemplo, la mayor parte de los consumidores de automóviles, electrónica, etc., han acabado asociando el adjetivo «japonés» con el de alta calidad, y ello no es fruto de una moda pasajera. Las empresas occidentales deberán emplear las mismas armas, y la calidad no es la única, si desean competir con éxito en un mundo de economía globalizada. Además, hay que ser conscientes de que la calidad debe ser un objetivo crítico para incrementar la competitividad de las empresas de servicios. En este sector es más compleja la implantación de un buen sistema debido a la mayor dificultad para medir los resultados obtenidos y compararlos con unos estándares adecuados. Sin embargo, ello no es una tarea imposible, sino una meta alcanzable, aunque ello pueda necesitar más tiempo que en las empresas fabriles.

REFERENCIAS Y BIBLIOGRAFIA

CHAUVEL, A. M.: «Résoudre un Problème», Dunod, 1992.
COLE, R. E.: «The Quality Revolution», *Production and Operations Management*, vol. 1, núm. 1 (págs. 118-120), 1992.
DRUCKER, P. E.: «The emerging theory of Manufacturing», *The new Manufacturing*, Harvard Business Review, número 90080, 1991.
DOUCHY, J. M.: «Vers le "Zéro Défauts" dans l'entreprise», Bordas, 1987.
ERNST & YOUNG: «Calidad Total», TGP, Tecnologías de Gerencia y Producción, 1991.
FEA, H.: «Hacia un nuevo concepto de empresa occidental», Marcombo, 1993.
FUENTE GONZÁLEZ, F., y otros: «Temas Actuales de Gestión de Empresas», Publicaciones del CUR, 1980.
GARBIN, M., e INVREA, G.: «El Control de Calidad», Deusto, 1979.
GITLOW, H. S.: «Planificando para la Calidad», Ventura Ediciones, 1991.
HARRINGTON, H. J.: «El Coste de la Mala Calidad», Díaz de Santos, 1990.
HASEN, B. L.: «Control de Calidad», Hispano-Europea, 1980.
JURAN, J. M.: «Juran y el liderazgo para la calidad», Díaz de Santos, 1990.
JURAN, J. M.; GRYNA, F. M., y BINGHAM, R. S.: «Manual de Control de Calidad», Reverté, 1990.
LABOUCHEIX, V., y otros: «Tratado de la Calidad Total», tomos 1 y 2, C. D. N., Ciencias de la Dirección, 1992.
MACHUCA, J. A. D.; DURBÁN, S., Y MARTÍN, E.: «El Subsistema Productivo de la Empresa», Pirámide, 1990.
MACHUCA, J. A. D.; GARCÍA, S.; DOMÍNGUEZ, M. A.; RUIZ, A., y ALVAREZ, M. J.: «Dirección de Operaciones: Aspectos estratégicos en la producción y en los servicios», McGraw-Hill, 1994.
MIZUNO, S.: «La Calidad Total en la Empresa», T. G. P., Tecnologías de Gerencia y Producción, 1989.
PEÑA, D., y PRAT, A.: «Cómo Controlar la Calidad», Instituto de la Pequeña y Mediana Empresa Industrial, 1990.
SCHROEDER, R. G.: «Operations Management», McGraw-Hill, 1993.
SERIEYX, H.: «El Desprecio Cero», McGraw-Hill, 1993.
WALTON, M.: «El Método Deming en la práctica», Parramón, 1992.
WEGNED, L. F.: «El Milagro Japonés», ESIC, Editorial, 1988.

CAPITULO 12

EL CONTROL DE CALIDAD

12.1. INTRODUCCION AL CONTROL DE CALIDAD

En el capítulo anterior se comentaron los elementos más importantes que influyen en la calidad: la materia prima, la maquinaria, los métodos, el hombre y la organización. La **materia prima** es una composición atómica o molecular. Valga como ejemplo saber que 56 gramos de hierro son más de 600.000 «trillones» de átomos; por muy idénticos que sean, no hace falta ni plantearse la probabilidad de que no haya alguna diferencia, por mínima que sea, entre dos trozos de éste o de cualquier otro material. **Las máquinas** son un conjunto de mecanismos, combinados para recibir una forma determinada de energía, transformarla y restituirla en otra apropiada, o bien para producir un efecto determinado. Tendrán vibraciones, desgastes; la energía que consumen no tiene por qué ser uniforme, etc. ¿Se podría asegurar que su funcionamiento es invariable? Con respecto a la variabilidad de la **persona**, usted es una de ellas no hace falta comentar nada.

Sin seguir adelante con los elementos que faltan (aquellos que se catalogaron en el capítulo anterior como «más importantes», no como los únicos), se puede explicar por qué es casi imposible obtener dos productos exactamente iguales. Por tanto, si la empresa se ha propuesto fabricar productos con unas determinadas características, habrá que tener una especial atención para asegurarse de que realmente las tengan. De comprobar que esto ocurre, se encargará, en parte, el control de calidad. Habría que recordar lo dicho en el capítulo anterior con respecto a que lo comentado para los **productos** también será aplicable a los **servicios.**

12.2. EL CONTROL DE CALIDAD

Por Control, según la Real Academia Española de la Lengua, se entiende «comprobación o inspección», o sea, un acto *a posteriori* que se limitaría, en el caso de la producción en la empresa, a la verificación de los productos, separando los «buenos» (que se aproximan satisfactoriamente a las especificaciones) y los «malos». Esta separación de productos, o inspección *a posteriori*, no se ajusta al concepto moderno de control, cuyo sentido es, por un lado, el de observación y corrección de las desviaciones respecto a los objetivos deseados y, por otro, el de prevención, es decir, tomar medidas previas que garanticen, con la mayor exactitud posible, la obtención de lo esperado.

El estándar industrial japonés JIS Z 8101-1981, define al control de calidad (QC[1], *Quality Control*) como un «sistema de técnicas para producir económicamente mercancías y servicios que cumplan las necesidades de los clientes»[2]. Juran (y otros, 1990, pág. 14) lo define como el «proceso de regulación a través del cual podemos medir la calidad real, compararla con las normas y actuar sobre la diferencia». Ambas definiciones son insuficientes si se consideran de forma aislada. En realidad son más bien complementarias, ya que la primera lo entiende como un conjunto de técnicas, y ello se puede entender como las herramientas a utilizar para conseguir algo; ese algo podría ser el proceso expuesto por Juran, el cual, como se verá más adelante, es el conjunto de funciones del Departamento de Inspección de Control de Calidad.

Así pues, a nuestro juicio, el **control de calidad** se debe entender como el **conjunto de esfuerzos de toda la empresa**, incluidos finanzas, marketing, personal, etcétera, **encaminados a la obtención de los productos conforme a las especificaciones requeridas y al mínimo coste**. Esta definición es lo que se entiende, hoy en día, como **control de calidad total** (TQC, *Total Quality Control*), ya que éste compete a todos dentro de la empresa y no sólo a la inspección, como podría pensarse en un principio; ésta por sí sola no aumentará la calidad intrínseca del producto, sino que solamente dará información sobre la calidad con la que el producto sale y sobre las desviaciones respecto a las especificaciones. Las grandes compañías están introduciendo, además, en este concepto a los proveedores, subcontratistas y, en general, a todos aquellos que tienen alguna relación con la empresa y con su desarrollo, lo que ha dado origen al **Control de Calidad Global de la Empresa** (CWQC, *Company Wide Quality Control*).

Volviendo al control de calidad dentro de la empresa, debemos ser conscientes de que:

- La **dirección** debe especificar, claramente, el nivel de calidad deseado.
- El **operario** puede aumentar la calidad del producto. De hecho esta es la base de los círculos de control de calidad, que se verán más adelante.
- Los **inspectores** pueden comprobar si se cumplen o no las especificaciones y en qué medida.

Un fallo en cualquiera de estos tres niveles hará fracasar los objetivos perseguidos. Por tanto, toda la empresa es responsable de la calidad y no sólo el Departamento de Inspección, como se venía suponiendo hasta ahora. Dicho Departamento es un órgano *staff*, que debe informar a la Dirección y comprobar la calidad, coordinando todos los esfuerzos para que ésta resulte lo más económica posible. Sus funciones, de alguna manera representadas en la Figura 12.1, son por tanto:

- Inspección e información de la ejecución.
- Comparación y propuesta de medidas correctoras.

Este Departamento de Inspección está desapareciendo o, mejor dicho, transformándose, debido a la nueva cultura de calidad que se está introduciendo poco a poco en las empresas. En ella, como se indicó en el capítulo dedicado al J. I. T., la base de la mejora es el mismo operario, debido a que es el que mejor conoce su

[1] Las abreviaturas que se utilizarán en este capítulo son las más utilizadas en nuestro país, por lo que el lector podrá encontrar que tienen dos fuentes diferentes, la anglosajona y la castellana.
[2] Esta definición procede del original japonés del JIS 8101-1981, no de la versión inglesa de dicha obra.

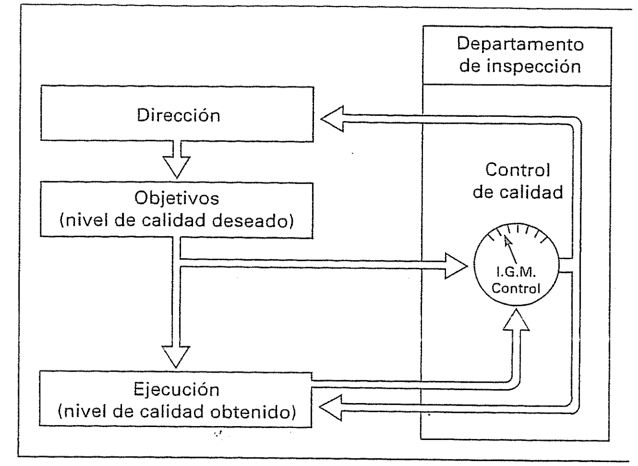


Figura 12.1. Funciones del Departamento de Inspección.

puesto de trabajo, estando, en principio, bastante capacitado para diagnosticar, y así poder corregir, las causas de las posibles anomalías que se estén produciendo[3]. Esta es la clave de las dos políticas que más se intentan aplicar hoy en día, el autocontrol y los círculos de control de calidad (ver también el Capítulo 7, Apartados 7.4 y 7.5).

12.3. AUTOCONTROL

Si el trabajo se organiza de manera que capacite a una persona para tener completa posibilidad de alcanzar los resultados planificados, se dice que esa persona trabaja en estado de **autocontrol**, pudiéndosela, entonces, considerar responsable de los resultados. Este concepto debe ser aplicado a la totalidad de la empresa, desde el gerente o director general responsable de dirigirla hasta el operario que maneja una determinada máquina. Para que una persona esté en situación de autocontrol deben cumplirse, con anterioridad, tres criterios fundamentales (Juran y otros, 1990, pág. 270):

- Conocimiento de lo que **se supone se va a hacer**, por ejemplo beneficio esperado en el caso del director general, especificaciones requeridas para el mecánico, etc.
- Conocimiento de lo que **se está haciendo**, por ejemplo, beneficio real, grado de conformidad con las especificaciones.
- Medios para **corregir** lo que se está haciendo, en caso de que se falle en el cumplimiento de los objetivos. Estos medios deben incluir siempre la **autoridad** y la **capacidad** para llevar a cabo las posibles correcciones, ya sea variando el proceso que está bajo su autoridad o bien variando su propia conducta.

Si todas las condiciones mencionadas se cumplen, se dice que la persona está en situación de autocontrol y puede considerarse, correctamente, que es responsa-

[3] En caso contrario se le suministrará la formación correspondiente.

ble de cualquier deficiencia en la realización de su labor. Si alguna de las condiciones no se cumple, la persona no puede controlar lo que está haciendo, por lo que no se le debe responsabilizar de las deficiencias que pudieran aparecer.

12.4. CIRCULOS DE CONTROL DE CALIDAD

Los círculos de calidad nacen en Estados Unidos y son ampliamente utilizados durante y después de la Segunda Guerra Mundial; sin embargo, la mayor parte fracasó a pesar del entusiasmo inicial. La causa fundamental de dicho fracaso fue la no utilización, dentro de los mismos, del Control Estadístico de la Calidad (C. E. C.); por el contrario, el empleo del mismo en los círculos de calidad japoneses fue la clave del impactante éxito de los mismos (Drucker, 1991). Ello fue debido a que el C. E. C. proporciona, tanto a la dirección como a los operarios, la retroalimentación de información necesaria para conocer los efectos de las sugerencias de los trabajadores y, con ello, la posible consecución de dos metas que, hasta entonces aparecían como contradictorias (Drucker, 1991):

- Una alta calidad y productividad.
- El enriquecimiento del trabajo humano.

Ante esta nueva situación, no es extraño que los círculos de control de calidad hayan tenido un éxito tan espectacular, aplicándose en empresas de todos los continentes y de todos los sectores, desde la manufactura a los servicios.

Kaoru Ishikawa, en *General principes of the QC Circle*, define los círculos de calidad como *un pequeño grupo que voluntariamente desarrolla actividades de control de calidad dentro de un área de trabajo concreta. Además, este pequeño grupo es una organización con continuidad, actuando dentro de las actividades de control de la compañía, para el propio desarrollo mutuo, el control del proceso y las mejoras dentro de un centro de trabajo, utilizando técnicas de control de calidad con plena participación de todos los miembros.*

Los conceptos en los que se basan las actividades de estos circulos, dentro del esfuerzo global de la empresa en el control de calidad, son (Ishikawa, 1989, pág. 20):

- Contribuir a la mejora y desarrollo de la empresa.
- Respeto a los valores humanos y construcción de entornos más atractivos y vidas más valiosas.
- Dar completas oportunidades a las capacidades de cada uno y promocionar y aprovechar el potencial infinito de cada individuo.

Siguiendo los consejos de Kaoru Ishikawa, es conveniente explicar con algo más de detalle los elementos que entran a formar parte de la definición de los QCC.

- **Pequeño grupo:** Aunque muchos consultores y profesores han teorizado sobre la conveniencia del trabajo en grupos (fruto de ello son las teorías X, Y y Z), no fue esto lo que movió a Ishikawa en su elección, sino la experiencia y la filosofía japonesas, que dicen al respecto que tres cabezas igualan a la sabiduría de la diosa Manjushiri (diosa de la sabiduría budista). Este principio también era conocido en Occidente, desde el refrán popular que dice que dos cabezas son mejor que una, hasta el principio marxista que, refiriéndose a las capacidades del hombre, afirma que uno más uno no son dos. Lo cierto es que, por el conocido efecto de la **sinergia**, el resultado que se obtiene cuando varias personas se reúnen para pensar sobre algo es siempre mejor que el que se obtendría con una sola persona.

- **Voluntariamente:** Esta es la traducción que se le ha dado al término japonés *jishuteki*, que realmente puede significar independiente, voluntario, autónomo, etc. Según Ishikawa (1989, pág. 5) es uno de los factores más importantes en la determinación del éxito o fracaso de un QCC. Esto se debe a que las personas que lo forman lo han hecho por decisión propia, buscando e implementando mejoras continuamente y no obedeciendo órdenes desde un nivel superior. Ello hace que los trabajadores no dejen de tener iniciativas, pudiéndose convertir en prolongaciones de las máquinas, lo cual sería una fuente de malestar y se generaría una serie de consecuencias nada buenas para la empresa (descenso de la productividad, incremento de productos defectuosos, etc...). Por supuesto que no hay que olvidar que estos círculos estarán bajo el control de una dirección que les ha marcado los objetivos a cumplir.
- **Desarrollo de las actividades de control de calidad:** El objetivo de estos círculos es la calidad. Para alcanzarla se necesita integrar en sus actividades el control de costes, los beneficios, la productividad, los programas de entrega, la seguridad y todos los factores que afecten al taller.
- **Dentro del mismo taller:** Esto quiere indicar que es un grupo de personas que trabajan juntas, por lo que el círculo así formado existirá mientras lo haga el taller. Es decir, el círculo de control de calidad es una organización continua. Algunas veces es necesario reunir a personas que trabajan en diferentes talleres para resolver un problema específico; se les suele llamar **equipos QC**, o «*task forces*», que se disolverán una vez resuelto el problema por el que se reunieron.
- **Desarrollo mutuo:** Esta es una frase que no solía escucharse en ningún taller; sin embargo, se ha acuñado para expresar una faceta esencial de los QCC. Existe un proverbio japonés que relata cómo una rana en un pozo piensa que las paredes de éste son el límite del Universo. Una persona con una visión restrictiva acerca de su puesto de trabajo tiene que estar también muy limitada conceptualmente, por lo que difícilmente será capaz de desarrollar ideas nuevas. Hay que hacer esfuerzos para sacar al trabajador de su «pozo» (puesto de trabajo habitual) y mostrarle lo que hay más allá. Es decir, darle formación y ayudar a que vea y aprenda lo que se hace en otros puestos de trabajo, incluso fuera de su empresa, con lo que podrá sacar ideas para mejorar su labor diaria.
- **Control del proceso y mejoras dentro del taller:** Antes de generar mejoras en el taller hay que controlar el proceso actual, suponiendo que el proceso, al que se le va a suministrar el fruto del trabajo, es un cliente externo. Si se consigue que en todos los puestos de trabajo se piense de este modo, la empresa fabricará productos de alta calidad. En caso de que se produzcan defectos o accidentes, los círculos tendrán que investigar las causas y buscar la forma de que no se repitan; el resultado de esto será una mejora del proceso.
- **Utilización de las técnicas de control de calidad:** El control y análisis de los procesos debe hacerse usando herramientas para el control de calidad, las siete herramientas básicas, que se comentarán o estudiarán en este capítulo, son:

  - Diagramas de Pareto.
  - Diagramas causa-efecto.
  - Estratificación.
  - Listas de chequeo.
  - Histogramas.
  - Diagramas de correlación.
  - Gráficos de control.

Según la mayoría de los especialistas japoneses, la falta de la educación adecuada en los métodos y en las herramientas anteriormente enunciadas fue la causa de que el movimiento del Cero Defectos (ZD, *Zero Defects*), surgido en Estados Unidos en agosto de 1962, fracasara, ya que consistió simplemente en un llamamiento a los trabajadores para que cometiesen menos errores.

∘ **Con plena participación de todos sus miembros:** En los círculos de control de calidad, la participación plena de todos sus miembros no tiene el mismo significado que cuando se hablaba del control de calidad global de la empresa. Se refiere tan sólo a que todos los miembros de un centro de trabajo participen en el QCC del mismo.

Antes de abandonar el tema de los QCC, es conveniente comentar la importancia que tiene la figura del líder en los mismos. Al ser estos organismos «autónomos», hay que asegurarse de que su función principal, la de generar nuevas ideas, no decaiga nunca, sino todo lo contrario, que se vaya potenciando continuamente, por lo que el líder ha de ser una persona capaz de conseguir este objetivo. Debe saber motivar al resto de los trabajadores para que no caigan en el error de pensar que han llegado a la perfección en el desarrollo de sus labores, inculcándoles la filosofía de que todo se puede mejorar.

12.5. HERRAMIENTAS PARA EL CONTROL DEL PROCESO

Como indicamos anteriormente, vamos a abordar el estudio de las principales herramientas existentes para controlar la calidad del proceso, sin que ello quiera decir que no existan otras[4].

12.5.1. Diagrama de Pareto

Muchas son las características que pueden hacer que un producto sea defectuoso, pero, generalmente, la mayoría de las pérdidas generadas por dicha razón se pueden atribuir a pocos tipos de defectos y éstos, a su vez, a un número relativamente pequeño de causas. Si se pueden identificar estas causas, se conseguirá eliminar casi todas las pérdidas mencionadas. Para esto se utiliza el **diagrama de Pareto;** con el que se pretende separar las causas que generan la mayoría de las pérdidas (a este grupo de **causas** se le suele llamar **vitales**) de las restantes, que, como es lógico, también generarán pérdidas, pero de mucha menor importancia (a éstas se les suele llamar **triviales**).

V. Pareto, economista italiano del siglo XIX, presentó en 1897 una fórmula en la que mostraba que la distribución del ingreso era desigual. Diez años más tarde, en 1907, el economista norteamericano M. C. Lorenz expresó una teoría similar, pero basándose en unos diagramas. Ambos demostraron que la mayor parte de los ingresos está en manos de muy pocas personas. Fue Juran el que aplicó los diagramas de Lorenz como fórmula para clasificar los problemas de calidad en los *pocos vitales* y *muchos triviales*, denominando a este método «el análisis de Pareto». Dicho análisis muestra que, en muchos casos, la mayoría de los defectos y, por tanto, los costes por ellos generados, se deben a un número relativamente pequeño de causas[5].

[4] Para un conocimiento más completo de las herramientas existentes para controlar la calidad del proceso, remitimos al lector a Ozeki (1992) y a Duncan (1989).

[5] Es la misma idea que la empleada para distribuir los inventarios de acuerdo con la clasificación ABC (Capítulo 1, Apartado 1.4.3).

Para la elaboración de este diagrama, el primer paso es decidir qué problemas se van a estudiar y cómo se recogerán los datos. A continuación se registrarán los datos elegidos y se realizará un recuento, ordenando éstos de forma tabulada de mayor a menor número de defectos, tal como puede verse en el Ejemplo 12.1. A continuación se calcula el porcentaje que cada tipo de defecto representa sobre el total y el tanto por ciento acumulado, de donde se obtienen los valores de la curva a representar. Una vez realizada ésta, se tendrán claramente separados los «pocos vitales» de los «muchos triviales».

EJEMPLO 12.1. Construcción de un gráfico de Pareto

Para facilitar la comprensión del diagrama de Pareto y de su elaboración, el lector se situará en una fábrica de cerámica. En primer lugar, como es obvio, habrá que decidir qué problema es el que se quiere investigar. En el caso a desarrollar, serán los artículos defectuosos que se generan. A continuación se realizará el recuento de dichos artículos, agrupándolos por el tipo de defecto que presentan (Tabla 12.1). Una vez que se tenga esta información, se ordenarán teniendo en cuenta el número de defectos (Tabla 12.2), de la misma forma en que se procedió para realizar la Tabla 1.1 del Capítulo 1. Igualmente se procederá para dibujar el diagrama de Pareto (Figura 12.2). En él se puede apreciar cómo los *pocos vitales* son los defectos B y D, que generan, tan sólo entre ellos, casi el 80 por 100 de los defectos, por lo que serían aquellos que se tendrían que controlar prioritariamente.

Tabla 12.1. Tipos de defectos

Tipo de defecto		Número defectos
A	Fractura	8
B	Rayado	36
C	Mancha	6
D	Tensión	94
E	Rajadura	4
F	Burbuja	12
G	Otros	3
Total		163

Tabla 12.2. Porcentaje de defectos y porcentaje acumulado

Tipo de defecto		(I) Núm. defectos	(II) % sobre total	(III) % acumulado
D	Tensión	94	57,67	57,67
B	Rayado	36	22,09	79,76
F	Burbuja	12	7,36	87,12
A	Fractura	8	4,91	92,03
C	Mancha	6	3,68	95,71
E	Rajadura	4	2,45	98,16
G	Otros	3	1,84	100
Total		163	100	100

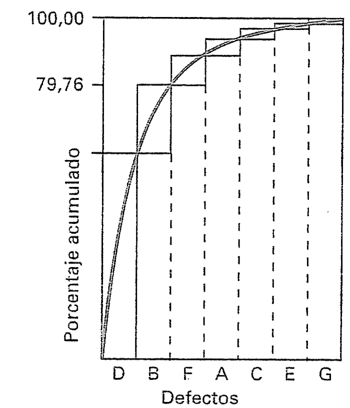


Figura 12.2. Diagrama de Pareto.

El diagrama ilustrado en el Ejemplo 12.1 se conoce como **Diagrama de Pareto de Fenómenos**. En él se relacionan, como se ha visto, los resultados indeseables y su importancia relativa. Existe otro tipo, que es conveniente hacer a continuación del anterior para cada *defecto vital*, que se denomina **Diagrama de Pareto de**

Causas. En él se relacionan las causas responsables de dichos resultados indeseables. De esa forma pueden detectarse, de manera análoga, las pocas causas vitales que generan esos defectos.

12.5.2. Diagramas de causa-efecto

Es un método bastante útil para clarificar las distintas causas que se piensan afectan a los resultados de un determinado trabajo, señalando, mediante flechas, la relación causa-efecto entre ellas. La Figura 12.3 muestra la estructura básica de un diagrama causa-efecto.

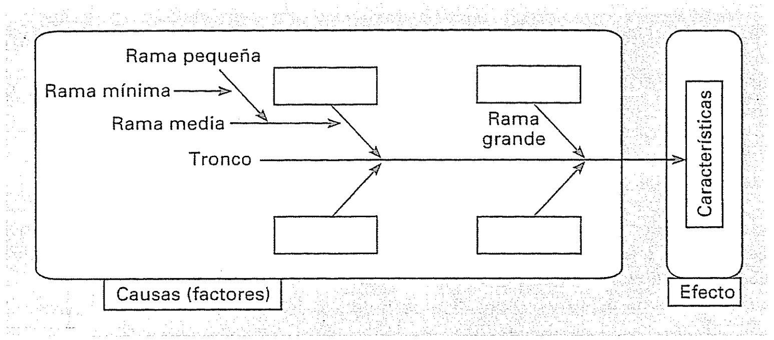


Figura 12.3. Estructura del diagrama causa-efecto (basado en Kaoru Ozeki, 1992, pág. 141).

A este diagrama se le conoce también bajo los nombres de: *«diagrama de espina de pescado»*, debido a su aspecto final (como se puede apreciar en la Figura 12.6); *«diagrama Ishikawa»*, ya que fue Kaoru Ishikawa el primero que lo utilizó para resolver problemas de calidad, o *«diagrama de características»*, haciendo referencia a su empleo para la identificación de la causa de diversas características de calidad. Como puede apreciarse en la figura anterior, a la derecha del diagrama se sitúa el «efecto», que es la característica de calidad sobre la que se quiere investigar. A la izquierda, todas las «causas» o factores que influyen en dicha característica.

Para desarrollarlo es necesaria la participación de todos aquellos que tienen algo que ver con el producto. Una vez que se tiene decidida la característica a analizar y trazado el tronco del diagrama, se clasifican las causas. Esta clasificación se puede llevar a cabo con dos políticas diferentes, expandiendo las ramas grandes o bien las pequeñas. En el caso de optar por la **expansión de las ramas grandes**, la clasificación se puede realizar agrupando las causas en cuatro grandes grupos (Figura 12.4): Materiales, Métodos, Máquinas y Medidas, que son las «4M» definidas por Ishikawa. En Francia (Douchy, 1987) , se utiliza a menudo un método similar que, por analogía, ha sido denominado de las «5M» (Figura 12.5); en él, las causas básicas son la Mano de obra, los Materiales, los Métodos, las Máquinas y el Medio, o entorno, donde se están desarrollando las actividades en estudio[6].

[6] De todas formas, es conveniente aclarar que estas clasificaciones de «4M» o «5M» son totalmente orientativas, pudiendo el usuario definir aquellas que él estime más oportunas, como es el caso que se represeta en la Figura 12.6.

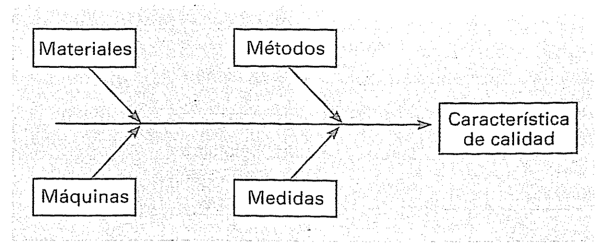


Figura 12.4. Diagrama causa-efecto de «4M».

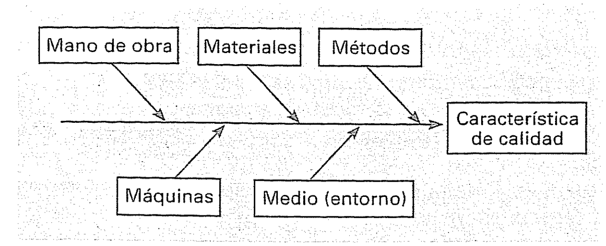


Figura 12.5. Diagrama causa-efecto de «5M».

A continuación se pasaría a estudiar las causas que influyen en cada una de las anteriormente definidas, obteniendo así las **ramas medias**; después las que influirían en las medias, con lo que se conocerían las **ramas pequeñas**, y así sucesivamente, hasta que se finalizase el diagrama. Dicho momento llegará cuando no se pueda definir ninguna causa más que pueda afectar a la característica en estudio.

Si se opta por la **expansión de las ramas pequeñas**, lo que suele hacerse es enumerar todas las causas que puedan influir en el caso de estudio y, después, ir agrupándolas y clasificándolas, de forma que se obtenga el diagrama final. Para la obtención de las diversas causas es aconsejable la realización, por parte del grupo que va a construir el diagrama, de varias sesiones de *brainstorming*[7], dichas sesiones son reuniones del grupo, en las que sus miembros expresarán libremente cuantas sugerencias se le ocurra sobre el tema discutido, evitando cualquier expresión de crítica sobre las ideas emitidas.

Una vez establecido el diagrama, los participantes deben asegurarse de que no se ha omitido ningún factor, insertándolo en su lugar correspondiente en caso de que esto hubiera sucedido. Se llega así a un diagrama completo en el que se podrán identificar los factores que afectan fuertemente a la característica estudiada, pudiendo de esta forma atacar dichas causas y asegurar la calidad prevista como objetivo. El resultado de todos estos pasos sería un diagrama como el de la Figura 12.6, donde se ha representado el correspondiente a las causas que generan la variación dimensional de una determinada pieza.

Hay que hacer notar que este método es un análisis causa-efecto clásico, no teniendo en cuenta posibles bucles que puedan existir entre las variables que en él aparecen.

12.5.3. Estratificación

Es un método para identificar la fuente de la variación de los datos recogidos, clasificando éstos según varios factores. Por ejemplo, cuando el producto cuya característica queremos estudiar es realizado en varias máquinas, o por varios operarios, es mejor clasificar los datos obtenidos según la máquina o el operario, de tal forma que la diferencia entre máquinas o trabajadores pueda ser analizada por separado.

[7] Para un mayor desarrollo de este método, remitimos al lector a J. A. D. Machuca y otros (1994, Cuadro 4.3).

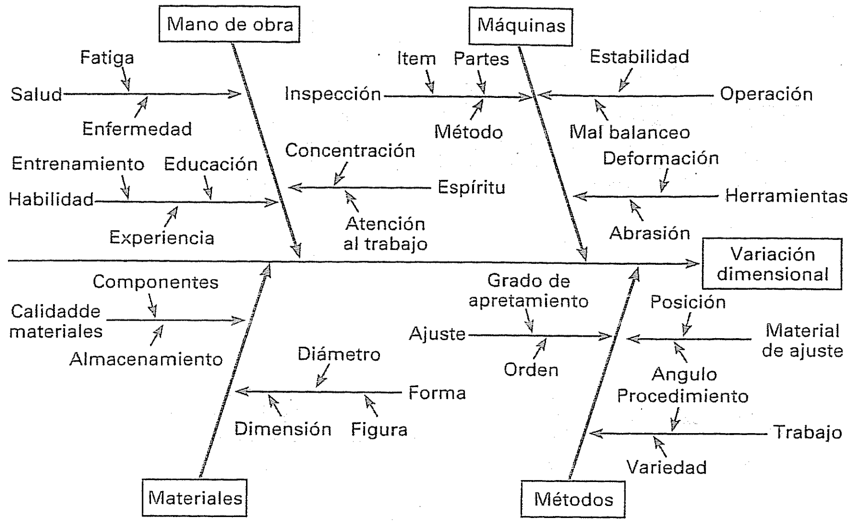


Figura 12.6. Diagrama causa-efecto para una variación dimensional (basado en Hitoshi Kume, 1992, pág. 47).

12.5.4. Listas de chequeo

Teniendo en cuenta que la labor principal del operario es realizar una determinada actividad para la consecución de un producto, la recogida de datos debe prepararse de la forma más simple posible. De esa forma no retrasará el proceso y la interpretación de dichos datos será lo más fácil y rápida posible. En esta línea, una **lista de chequeo** es un impreso, con formato de diagrama o tabla, preparado por anticipado para registrar datos, de tal forma que se pueda recoger toda la información necesaria con una simple marca de chequeo. La tabla 12.3 muestra un ejemplo ilustrativo.

Tabla 12.3. Lista de chequeo

Defecto	9/3	10/3	11/3	12/3	13/3	16/3	17/3	18/3	19/3	20/3	Total
Fractura	/		//		/	/	/		/	/	8
Rayado	//	///	𝍸	///	𝍸	///	𝍸	𝍸	//	///	36
Mancha	/		/	/	/			/	/		6
Tensión	𝍸 ////	𝍸 𝍸	𝍸 ///	𝍸 𝍸	𝍸 ////	𝍸 𝍸	𝍸 𝍸	𝍸 ////	𝍸 𝍸	𝍸 ////	94
Rajadura		/		/		/		/			4
Burbuja	//		//		//	/	///	/	/		12
Otros		/				/				/	3

12.5.5. Histogramas

Como se decía a la hora de introducir este tema, es imposible mantener constantes en el tiempo todos los elementos de los que depende la calidad de un producto, por lo que se tendrán variaciones en cualquier característica del mismo. Los valores que midan dicha característica no estarán determinados de una manera desordenada, sino que seguirán una determinada distribución. Los histogramas, representan gráficamente la distribución de una muestra de datos, a partir de la cual se podrá tener una idea de cómo lo hace la población a la que representa, en nuestro caso toda la producción. A la vista del histograma se podrá comprobar si dichos datos están dentro de los límites permitidos de variación y si el valor deseado está centrado, lo cual sería lo ideal. El Ejemplo 12.2 ilustra cómo se construyen los gráficos mencionados.

EJEMPLO 12.2. Construcción de un histograma

Se ha medido, en milímetros, el diámetro de un taladro, produciéndose los resultados que aparecen en la Tabla 12.4. El valor especificado es de 10,5 ± 0,2 mm, pero se da una gran variación. Para ver el nivel de la misma se va a construir el histograma que lo representa.

Se comenzará calculando el **rango, *R*, de la muestra,** que mide la máxima diferencia que hay entre dos medidas de la misma (el mayor diámetro menos el menor). Para localizar estos dos extremos se establece un criterio; aquí se ha marcado en cada columna la medida más grande con el símbolo ☞, y la menor con ⇨. Realizada esta señalización, se ve cuál es la mayor de las marcadas con ☞ y cuál la menor de las ⇨, su diferencia será el rango. En este caso, dichos valores se han encuadrado en la tabla; el rango será: $R = 10{,}66 - 10{,}40 = 0{,}26$.

A continuación se procederá a calcular los **intervalos de clase** en los que se divide el rango, que para muestras comprendidas entre 50 y 250 elementos suelen ser 10 (Ozeki, 1992, pág. 164), debiéndose conseguir al realizar los cálculos de 6 a 10 intervalos. Aplicándolo al caso en estudio se tendrá: $h = R/10 = 0{,}26/10 = 0{,}026 \approx 0{,}03$.

De esta forma se define un intervalo de tres centésimas y, seguidamente, se asocian a ellos los datos de la Tabla 12.4. Este proceso está resumido en la Tabla 12.5, donde el número de elementos que entran en cada intervalo indica la frecuencia del mismo. Conocidas las frecuencias, se tendrán las alturas de las barras que forman el histograma, éstas aparecen en la Figura 12.7 junto con los límites admisibles de variación.

Tabla 12.5. Tabla de recuento

Intervalos	Chequeo	Frecuencia
10,40-10,43	𝍸 //	7
10,44-10,47	𝍸 𝍸 𝍸 ///	18
10,48-10,51	𝍸 𝍸 𝍸 𝍸 ////	24
10,52-10,55	𝍸 𝍸 𝍸 𝍸 ///	23
10,56-10,59	𝍸 𝍸 //	12
10,60-10,63	𝍸 𝍸 //	12
10,64-10,67	////	4

Tabla 12.4. Mediciones de diámetros

⇨ 10,44	10,55	10,52	10,53	10,52	10,53	10,50	10,53	10,50	⇨ 10,49
10,50	10,51	⇨ 10,43	☞ 10,61	10,56	10,48	☞ 10,57	10,56	10,51	10,55
10,45	10,47	10,44	10,48	10,53	10,56	10,48	10,60	⇨ [10,40]	10,51
⇨ 10,44	10,45	10,46	⇨ [10,40]	10,58	10,55	⇨ 10,45	☞ [10,66]	10,52	10,56
10,52	⇨ 10,42	10,50	10,48	☞ [10,66]	☞ 10,58	10,50	10,55	10,52	⇨ 10,49
☞ 10,64	10,53	10,45	10,45	10,56	10,56	10,47	⇨ 10,51	☞ 10,54	☞ 10,62
10,53	10,52	10,46	10,50	10,50	10,43	10,53	10,63	10,46	10,50
10,60	10,56	☞ 10,61	10,45	⇨ 10,49	10,43	10,56	10,62	10,49	10,60
10,52	10,59	10,48	10,53	10,51	⇨ 10,42	10,52	10,59	10,45	10,61
10,51	☞ 10,60	10,55	10,47	10,64	10,51	10,47	10,61	10,46	☞ 10,62

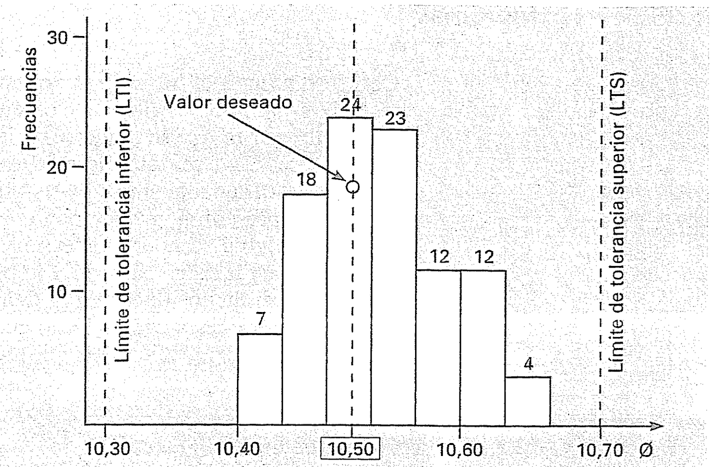


Figura 12.7. Histograma de los diámetros.

La Figura 12.8 representa una situación normal de fabricación. Es la que se denomina **forma general**, en la que la distribución es relativamente simétrica alrededor del valor máximo. En relación con la posición del diagrama respecto a los límites permitidos, se puede decir que lo ideal será que esté centrado, es decir, que la medida deseada coincida con la barra más alta y que las otras se distribuyan uniformemente a izquierda y derecha de la central, a la vez que van disminuyendo, sin llegar a la zona marcada por los límites (Figura 12.9).

Cuando esto no ocurre, suele ser debido a distintos problemas, siendo dos los más frecuentes: el primero, la **falta de centrado** (por ejemplo, Figura 12.10), en cuyo caso se debe comprobar el ajuste de la máquina, ya que suele ser éste el motivo más común. El segundo, **la dispersión** de los datos, que, lógicamente, deberían quedar dentro de los límites permitidos; a medida que aumenta aquélla, los valores del diagrama se acercan a los límites, pudiendo llegar a salirse fuera de ellos. Aquella parte de la producción que estuviera fuera del campo de tolerancias sería inservible (Figura 12.11). Este defecto se suele presentar cuando la máquina utilizada no es lo suficientemente precisa.

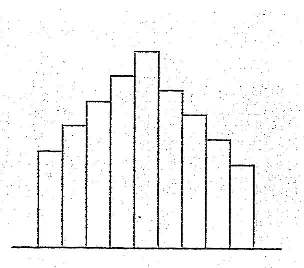


Figura 12.8. Forma general.

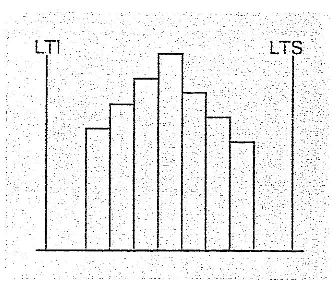


Figura 12.9. Centrado.

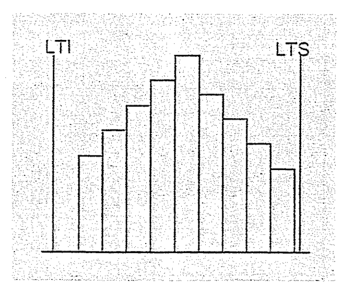


Figura 12.10. Descentrado.

La forma del diagrama también puede suministrar información de interés. Así, el de la Figura 12.12, conocido como **tipo peineta** o rueda dentada, indica que las amplitudes de los intervalos son múltiplos enteros de la unidad de medida usada en la escala, pudiendo ocurrir que los datos caigan en su mayor parte dentro de ciertos intervalos. Dividiendo la amplitud de los mismos debe desaparecer este efecto. El de la Figura 12.13 representa un caso bastante interesante, el de **doble pico**, provocado por la mezcla de muestras de dos o más fuentes diferentes. Para separarlas se ha de hacer una estratificación (ver Apartado 12.5.3).

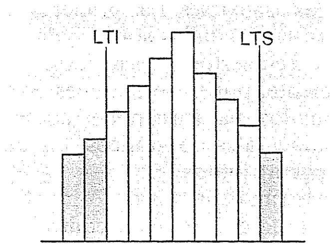


Figura 12.11. Gran dispersión.

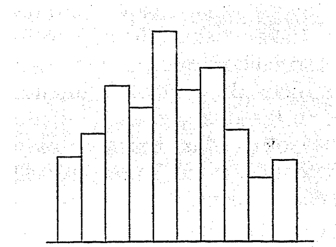


Figura 12.12. Tipo peineta.

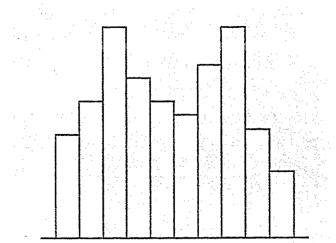


Figura 12.13. Doble pico.

12.5.6. Diagramas de correlación

Es una herramienta muy útil para investigar si existe reciprocidad entre dos características de un proceso. En unos ejes coordenados se sitúa en abscisas la escala correspondiente a una de ellas (por ejemplo, la velocidad de corte de una determinada pieza) y en ordenadas la correspondiente a la otra (por ejemplo, la rugosidad en la superficie del corte). En cada realización del proceso se miden los valores X_i e Y_i de ambas características, los cuales definirán un punto en el plano anteriormente definido. Tras una serie de medidas, se tendrá una nube de puntos, de cuya estructura podrá deducirse si existe o no correlación y si ésta es positiva o negativa. Las Figuras 12.14, 12.15 y 12.16 ilustran dichas posibilidades.

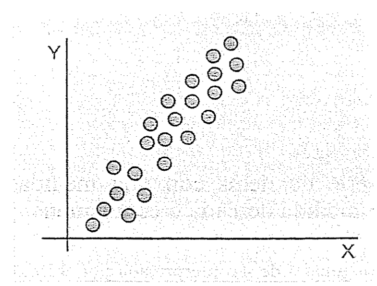


Figura 12.14. Correlación positiva.

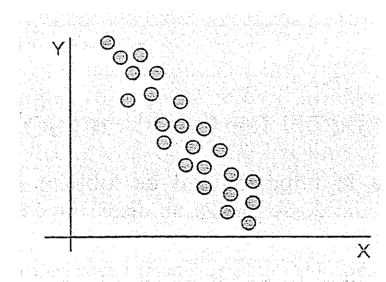


Figura 12.15. Correlación negativa.

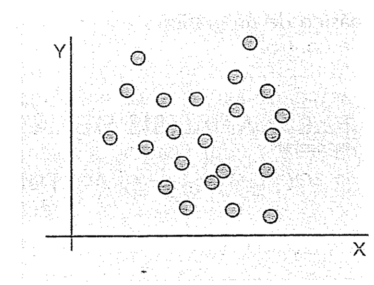


Figura 12.16. No hay correlación

12.5.7. Gráficos de control

Es una opinión generalizada que estos gráficos marcaron el comienzo del control de calidad. Fueron inventados en 1924 por Walter A. Shewart en los Laboratorios de la Bell Telephone y se pueden definir como «una comparación gráfico-cronológica de una característica de la calidad actual del producto con los límites de calidad extraídos de las experiencias anteriores».

Como hemos comentado anteriormente, las características de calidad de un producto están siempre sujetas a variaciones, no existiendo proceso de fabricación que pueda realizar dos productos idénticos. Las causas que generan este hecho pueden ser de dos tipos: las aleatorias (o naturales) y las asignables. Las primeras se producen por el azar y son difícilmente identificables; las segundas son debidas a motivos muy específicos, que pueden ser fácilmente descubiertos y corregidos.

Con los gráficos de control se intenta, precisamente, poner de manifiesto la separación entre los dos grupos de causas mencionados, para así poder actuar más fácilmente sobre ellas. Existen dos tipos fundamentales de gráficos: los de control para medidas o variables y los de control por atributos.

Ambos tienen el mismo aspecto (Figura 12.17) y se usan de la misma forma. En el eje de ordenadas aparece la medida, o rango del atributo que se quiere controlar, situándose los límites de control (LC) y un valor central (VC). El eje de abscisas es el tiempo, y en él se representa la evolución de la característica de calidad que se quiere controlar, comparándola continuamente con los valores mencionados del eje de ordenadas. En los apartados posteriores tendremos ocasión de ver distintos gráficos de control y de aclarar los conceptos mencionados. Es precisamente su importancia y extendido uso lo que nos ha empujado a tratarlos separadamente con más profundidad que las técnicas anteriores. Para facilitar su comprensión estudiaremos previamente el análisis de la precisión de un proceso.

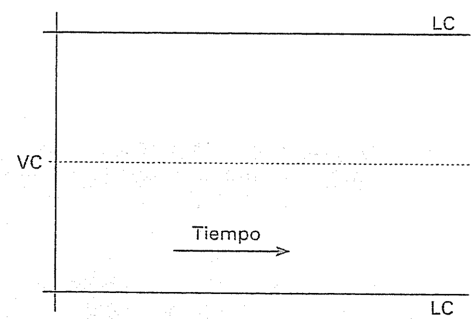


Figura 12.17. Esquema básico de un gráfico de control

12.6. ANALISIS DE LA PRECISION DE UN PROCESO

Debido a la imposibilidad de fabricar una serie de ítems con una medida[8] idéntica, cuando se realiza un diseño se define la medida deseada o **cota nominal** y un cierto intervalo de variación en el que dicho ítem puede ser útil. Este se denomina campo de tolerancias y está acotado por dos límites, el **límite de tolerancia superior (LTS)** y el **límite de tolerancia inferior (LTI)**. Como ejemplo, la Figura 12.18 muestra el diámetro de un taladro cuyo valor nominal es de 10 milímetros, pero que se podrá utilizar siempre y cuando esté comprendido entre el LTS (10 + 0,05 = 10,05) y LTI (10 − 0,05 = 9,95).

Así pues, a la hora de la fabricación, el campo definido por los **límites de variación** de las medidas de los taladros debería ser inferior al campo de tolerancias y, además, estar comprendido dentro de este último. Llamando **límite de variación superior (LVS)** a la cota más grande que se produzca y el **límite de variación inferior (LVI)** a la más pequeña, la condición expuesta anteriormente se podría expresar como: LTS > LVS > LVI > LTI. Esta condición ideal se podría representar mediante un histograma como se puede apreciar en la Figura 12.19.

Cuanto menor sea el campo de variación más preciso será el proceso. Para clasificar la precisión del mismo existen varios métodos; aquí se seguirá el que utiliza el **Indice Relativo de Precisión (IRP)**, que se calcula como el cociente entre el campo de tolerancias y el rango medio, o media de los rangos[9] de las muestras que se obtengan para estudiar el proceso. Así pues: IRP = (LTS − LTI)/$\bar{R}$[10], cuyo valor, en función del tamaño (n) de la muestra utilizada, permitirá clasificar la precisión como alta, media o baja (Tabla 12.6)

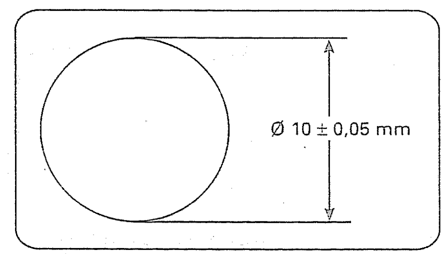


Figura 12.18. Medida con especificación de los límites de tolerancia.

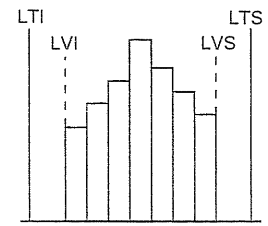


Figura 12.19. Situación ideal de los LT y LV.

n	Precisión		
	Baja	Media	Alta
2	<6,0	6,0 ÷ 7,0	>7,0
3	<4,0	4,0 ÷ 5,0	>5,0
4	<3,0	3,0 ÷ 4,0	>4,0
5 o 6	<2,5	2,5 ÷ 3,5	>3,5

Tabla 12.6. Valores del Indice Relativo de Precisión (extraída de J. A. D. Machuca y otros, 1990, pág. 590).

Nótese que, a medida que el campo de variación va aumentando, también lo harán los rangos, ya que será mayor la diferencia entre los datos de las muestras y, por tanto, el rango medio, con lo que el IRP irá disminuyendo y la precisión bajando. Es decir, a medida que los límites de variación se acerquen a los de tolerancia, la precisión del proceso irá descendiendo, con lo que será mayor el riesgo de que se fabriquen piezas defectuosas.

[8] La medida a la que se va a hacer referencia en este epígrafe ha de ser interpretada por el lector como una característica cualquiera de calidad. La elección de la utilizada en nuestro ejemplo ha sido debida a que opinamos que será la más cómoda para el desarrollo y comprensión de éste.

[9] Definidos en el Ejemplo 12.2.

[10] $\bar{R}$ es el rango medio, obtenido como la media de los rangos de las muestras estudiadas.

12.7. GRAFICOS DE CONTROL POR VARIABLES

12.7.1. Los gráficos $\bar{X}$ y R

Muchas de las distribuciones halladas en el control de calidad se aproximan a la curva normal (Hansen, 1980, pág. 27). Si es éste el caso de la población que se está examinando, lo cual puede deducirse de un examen visual del histograma de las muestras, los resultados de éstas permitirán inducir ciertas inferencias acerca de la población. Como es sabido, una normal se define por dos parámetros, la media, μ, y la desviación típica, σ', a partir de los cuales se obtiene una serie de intervalos que contienen un determinado tanto por ciento del área de la distribución. Estos son $\mu \pm \sigma'$ (68,26 por 100 del área), $\mu \pm 2\sigma'$ (95,46 por 100) y $\mu \pm 3\sigma'$ (99,73 por 100). Es precisamente este último el que va a definir los denominados **límites de variación natural** del proceso (LVN).

$$LVN = \mu \pm 3\sigma'$$

Dado que estos límites comprenderán el 99,73 por 100 de la producción, habrá que comprobar que quedan dentro del campo definido por los límites de tolerancia, ya que, en caso contrario, una parte de la producción sería defectuosa (Figura 12.11). El primer paso será verificar si son representativas las muestras con las que vamos a trabajar. Para ello, según la mayoría de los autores, se deben tomar de 100 a 150 elementos, agrupándolos en muestras de 4 o 5 unidades (por ejemplo, Garbin e Invrea, 1979, pág. 323) y hacerles dos filtrajes consecutivos, el del gráfico R y el del gráfico $\bar{X}$.

Como vimos en el Ejemplo 12.2, el rango de una muestra «i», R_i, se definía como la diferencia entre la medida más grande y más pequeña de la misma, es decir: $R_i = x_{imáx} - x_{imín}$. De ello se puede deducir que si la variable x se distribuye según una normal, también lo hará R, por lo que el 99,73 por 100 de sus valores tendrá que estar en el intervalo de las 6σ. Los límites fijados en este intervalo se denominan **límites de control** del gráfico R (o **gráfico de recorrido**), el rango medio, $\bar{R}$, calculado a partir de los rangos de las respectivas muestras, será el valor central de éste. Su expresión será: $LCR = \bar{R} \pm 3\sigma_R$.

Una estimación de σ_R es $d_3\sigma'$ (Duncan, 1989, pág. 472), donde d_3 es un parámetro cuyo valor depende del tamaño de la muestra (Tabla 12.7). Como la desviación típica, σ', es una medida de la dispersión que tienen los datos, al igual que el rango, se puede establecer una relación entre ellas en función de un cierto parámetro, d_2, que también dependerá del tamaño de la muestra[11] (Tabla 12.7): $\sigma' = \bar{R}/d_2$. Con lo que, sustituyendo esta expresión en la estimación de σ_R y llevando el resultado a la de los LCR, se tendrá: $LCR = \bar{R} \pm 3d_3\sigma' = \bar{R} \pm 3d_3(\bar{R}/d_2) = (1 \pm 3d_3/d_2)\bar{R}$.

Si al paréntesis con el signo positivo se le parametriza como D_4 y al del signo negativo como D_3, obtendremos la expresión definitiva de los límites de control superior, LCS_R, e inferior, LCI_R, para la R:

$$LCI_R = D_3\bar{R} \qquad LCS_R = D_4\bar{R}$$

Dentro de estos límites tendrán que estar comprendidos todos los rangos de las muestras utilizadas y en caso de que alguno(s) estuviera(n) fuera tendría(n) que ser eliminado(s), calculando, con las muestras restantes, el nuevo rango medio y los nuevos LCR. Si con estos nuevos límites hubiera muestras fuera de ellos se repetiría de nuevo el proceso, hasta que todos los rangos estuvieran dentro de los límites de control (ver Ejemplo 12.3). De esta forma se consigue que todas las muestras sean homogéneas con respecto a la dispersión que presentan. Seguidamente, de forma análoga a lo que se ha hecho para la R, habrá que calcular los límites de control para la variable, x, que se está estudiando.

[11] Para un análisis en profundidad de la relación entre los parámetros de la normal y los que se utilizan en control de calidad se recomienda la lectura de los Capítulos 7 y 8 de Hasen B. L. (1980).

Tabla 12.7. Parámetros para los gráficos de control (de J. A. D. Machuca y otros).

n	2	3	4	5	6	7	8	9	10
d_2	1,128	1,693	2,059	2,326	2,534	2,704	2,847	2,970	3,078
d_3	0,853	0,888	0,880	0,864	0,848	0,833	0,820	0,808	0,797
A_2	1,880	1,023	0,729	0,577	0,483	0,419	0,373	0,337	0,308
D_3	0	0	0	0	0	0,076	0,136	0,184	0,223
D_4	3,267	2,575	2,282	2,115	2,004	1,924	1,864	1,816	1,777
L	2,659	1,772	1,457	1,289	1,183	1,109	1,053	1,010	0,974
F	0,779	0,749	0,728	0,712	0,700	0,690	0,680	0,673	0,666

Así pues, se calculará la media, $\bar{x}_i$, de cada una de las muestras seleccionadas anteriormente, siendo $\bar{x}_i = \Sigma x_i/n$, y n el tamaño de la muestra. Conocidas las distintas $\bar{x}_i$, se calculará la media de las mismas, obteniendo la que se conoce como la gran media, $\bar{\bar{X}}$. Esta será el valor central de los límites de control para la x, por lo que éstos se calcularán como: $LCX = \bar{\bar{X}} \pm 3\sigma_{\bar{x}}$. Donde $\sigma_{\bar{x}}$ se puede expresar en función de $\bar{R}$, ya que $\sigma_{\bar{x}} = \sigma'/\sqrt{n}$ y sustituyendo σ' por la expresión utilizada anteriormente, tendremos $\sigma_{\bar{x}} = \bar{R}/d_2\sqrt{n}$. De donde $LCX = \bar{\bar{X}} \pm 3\bar{R}/d_2\sqrt{n}$. Denominando A_2 al coeficiente $3/d_2\sqrt{n}$, la expresión de los límites de control para la X, quedará:

$$LCS_{\bar{X}} = \bar{\bar{X}} + A_2\bar{R} \qquad LCS_{\bar{X}} = \bar{\bar{X}} - A_2\bar{R}$$

Todos los valores de las medias $\bar{x}_i$ tienen que estar comprendidos dentro de estos límites, debiendo eliminar aquellas medias que no cumplan dicha condición, recalculando, a partir de las restantes, la nueva $\bar{\bar{X}}$, con lo que se tendrían unos nuevos límites de control y se volvería a repetir el proceso igual que se hizo con el gráfico R. Todo este proceso está recogido en forma de diagrama de flujo en la Figura 12.20.

Una vez que las muestras hayan pasado estos dos filtrajes, se estará en disposición de ver si son o no válidos el proceso y el control que se van a realizar sobre él mediante los límites calculados anteriormente. La primera condición que se tiene que cumplir es que los límites de variación natural estén comprendidos dentro del intervalo definido por los límites de tolerancia. Para ello se calcularán los LVN, pero no con la fórmula general que se vio al principio de este apartado, sino sustituyendo σ' por la expresión de ésta en función de $\bar{R}$ y d_2, es decir:

$$LVN = \bar{\bar{X}} \pm 3\sigma' = \bar{\bar{X}} \pm 3\bar{R}/d_2$$

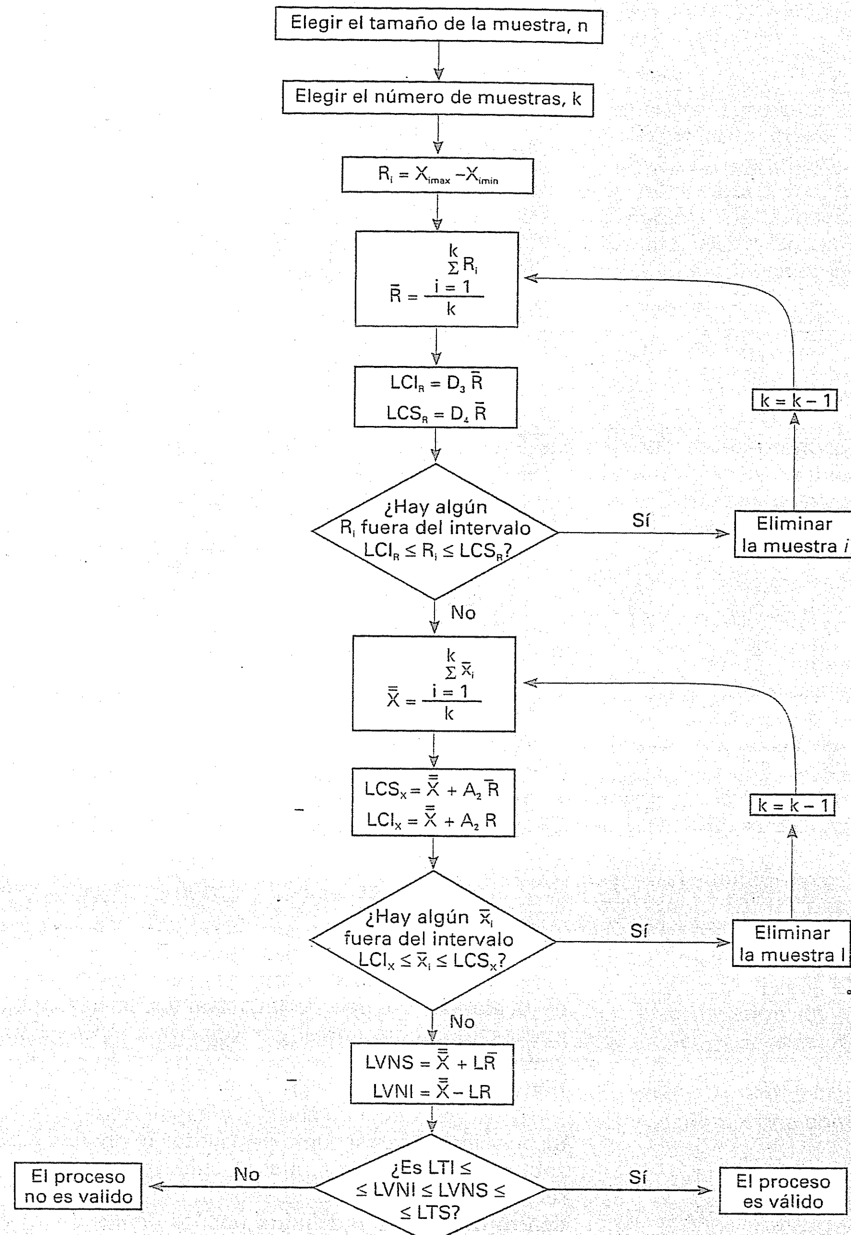


Figura 12.20. Diagrama para la construcción de los gráficos $\bar{X}-R$ (basado en J. A. D. Machuca y otros, 1990 (pág. 594).

Y llamando L[12] a $3/d_2$, se obtendrá la expresión genérica de dichos límites de variación natural:

$$\text{LVNS} = \bar{\bar{X}} + L\bar{R} \qquad \text{LVNI} = \bar{\bar{X}} - L\bar{R}$$

La segunda condición está relacionada con la precisión, la cual, como veremos, debe ser media. Si fuese baja, los límites de control estarían muy cerca de los límites de tolerancia, corriendo el riesgo de obtener muchos ítems inútiles por situarse fuera de los límites. Este caso tendría que comunicarse a los responsables del diseño, ya que la máquina definida o el método elegido no son los idóneos. Si la precisión fuese alta, el rango medio sería muy pequeño con respecto al campo de tolerancias, con lo que al ser función del $\bar{R}$ los límites de control, estarán bastante alejados de los de tolerancia (como se verá más adelante); esto llevaría a realizar paradas innecesarias en la máquina para ajustarla, lo cual es debido a la forma de controlar el proceso utilizando estos gráficos. Debido a lo anterior, en este caso es conveniente utilizar los **límites de control modificados**, LCM, que se definen a partir de los límites de tolerancia, situándolos a una distancia de los mismos igual a la existente entre los límites de variación natural y los límites de control. Dicha distancia se calcula como:

$$\text{LVNS} - \text{LCS}_x = (\bar{\bar{X}} + L\bar{R}) - (\bar{\bar{X}} + A_2\bar{R}) = (L - A_2)\bar{R} = F\bar{R}$$

Donde $F(=L - A_2)$ es un nuevo parámetro, relacionado en la Tabla 12.7, formulándose los límites de control modificados como:

$$\text{LCMS} = \text{LTS} - F\bar{R} \qquad \text{LCMI} = \text{LTI} + F\bar{R}$$

La Figura 12.21 muestra claramente cómo se sitúan los distintos límites a que hemos hecho referencia a lo largo del presente apartado.

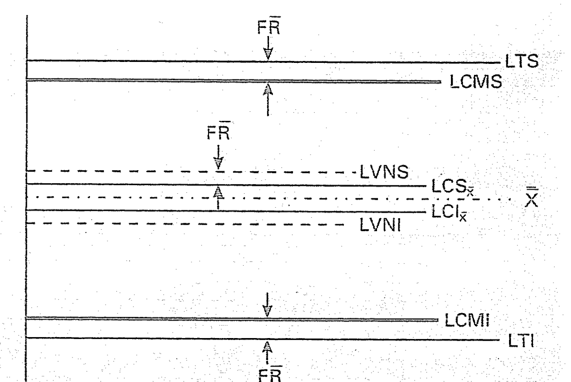


Figura 12.21. Situación de los LCM

[12] Parámetro tabulado en la Tabla 12.7.

EJEMPLO 12.3. Construcción de un gráfico de control

En el proceso de fabricación de unas esferas de acero se ha decidido la utilización de unos gráficos $\bar{X} - R$ para controlar el diámetro de las mismas, que debe ser de 25 mm con una tolerancia de +7 y −6 mm. Para ello se ha llevado ha cabo la medición de 30 muestras de cinco unidades cada una, el resultado de la misma es el que aparece en la Tabla 12.8.

Siguiendo los pasos marcados en la Figura 12.20, se calcula el rango de cada muestra, que aparece en la última fila de la tabla anterior; a continuación se obtiene el rango medio, en este caso $\bar{R}$ = 136/30 = 4,53. Para el cálculo de los LCR, se buscan en la Tabla 12.7 los valores de D_3 y D_4 a utilizar, los cuales, al ser $n = 5$, son, respectivamente, 0 y 2,115. Por lo que los límites de control serán:

$$LCI_R = D_3 \times \bar{R} = 0 \times 4{,}53 = \mathbf{0}$$
$$LCS_R = D_4 \times \bar{R} = 2{,}115 \times 4{,}53 = \mathbf{9{,}58}$$

Como se puede apreciar en la Figura 12.22 (ver nota 13), la muestra 27 no está dentro de los LCR, por lo que habrá que eliminarla, calculando de nuevo el $\bar{R}$ y los LC para las 29 muestras restantes.

Así, el nuevo $\bar{R}$ sería (136 − 10)/29 = 4,34, lo que da lugar a los nuevos límites de control:

$$LCI_R = D_3 \cdot \bar{R} = 0 \times 4{,}34 = \mathbf{0}$$
$$LCS_R = D_4 \cdot \bar{R} = 2{,}115 \cdot 4{,}34 = \mathbf{9{,}18}$$

Dentro de los cuales están ya todas las muestras, por lo que se pasa a calcular la media de cada una de ellas (penúltima fila de la Tabla 12.8) y, a partir de éstas (habiendo eliminado la 27), la gran media $\bar{\bar{X}}$ = 746/29 = = 25,72. Por tanto, los límites de control tentativos, una vez extraído A_2 de la Tabla 12.7, serían:

$$LCS_{\bar{X}} = \bar{\bar{X}} + A_2 \times \bar{R} = 25{,}72 + 0{,}577 \times 4{,}34 = \mathbf{28{,}22}$$
$$LCI_{\bar{X}} = \bar{\bar{X}} - A_2 \times \bar{R} = 25{,}72 - 0{,}577 \times 4{,}34 = \mathbf{23{,}22}$$

Tabla 12.8. Medidas de las muestras para los gráficos $\bar{X} - R$

Muestra	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30
Medida 1	27	25	23	26	25	22	28	24	24	26	25	23	25	25	24	24	28	26	30	26	28	25	27	25	26	23	25	23	27	25
Medida 2	24	26	27	25	29	23	27	27	27	26	30	28	26	27	24	27	29	28	26	29	26	27	29	24	25	24	26	27	23	25
Medida 3	28	29	25	28	25	29	25	27	26	25	23	25	23	23	25	23	25	27	30	27	24	24	26	28	26	27	30	24	24	26
Medida 4	27	28	24	25	26	24	26	26	24	27	28	24	26	26	25	28	26	25	28	27	25	26	25	26	27	24	20	28	25	24
Medida 5	26	23	27	27	24	23	26	24	23	25	27	22	24	27	23	27	24	28	32	28	25	27	23	21	25	28	27	22	24	28
Media	26,4	26,2	25,2	26,2	25,8	24,2	26,4	25,6	24,8	25,8	26,6	24,4	24,8	25,6	24,2	25,8	26,4	26,8	29,2	27,4	25,6	25,8	26,0	24,8	25,8	25,2	25,6	24,8	24,6	25,6
Rango	4	6	4	3	5	7	3	3	4	2	7	6	3	4	2	5	5	3	6	3	4	3	6	7	2	5	10	6	4	4

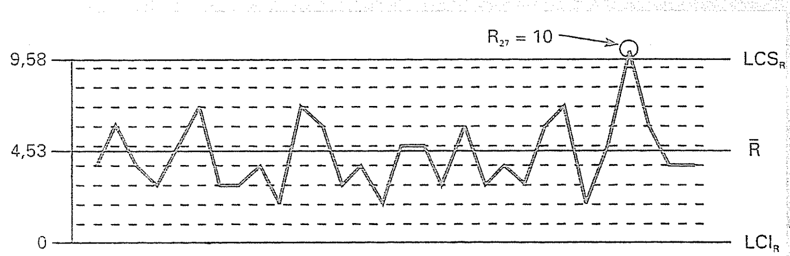


Figura 12.22. Gráfico *R*.

Quedando el gráfico[13]:

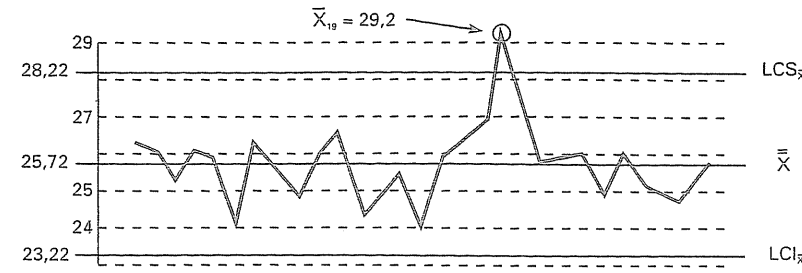


Figura 12.23. Gráfico $\bar{X}$.

Al igual que en el gráfico *R* se eliminan las muestras que estén fuera de los límites, en este caso sólo la 19, volviendo a calcular, con las restantes, los nuevos valores del valor central y los LC:

$$\bar{\bar{X}} = (746 - 29{,}2)/28 = \mathbf{25{,}6}$$

$$LCS_{\bar{X}} = \bar{\bar{X}} + A_2 \times \bar{R} = 25{,}6 + 0{,}577 \cdot 4{,}34 = \mathbf{28{,}10}$$
$$LCI_{\bar{X}} = \bar{\bar{X}} - A_2 \times \bar{R} = 25{,}6 - 0{,}577 \cdot 4{,}34 = \mathbf{23{,}01}$$

Dentro de estos límites se encuentran las 28 muestras utilizadas, por lo que se pasaría a calcular los límites de variación natural (LVN) para comprobar si están dentro del intervalo de tolerancia, definido por **LTS** = 25 + 7 = **32** y **LTI** = 25 − 6 = **19**. Para ello hará falta el parámetro *L*, que en este caso es 1,289 (Tabla 12.7), quedando los LVN definidos por los valores:

$$LVNS = \bar{\bar{X}} + L\bar{R} = 25{,}6 + 1{,}289 \times 4{,}34 = \mathbf{31{,}19}$$
$$LVNI = \bar{\bar{X}} - L\bar{R} = 25{,}6 - 1{,}289 \times 4{,}34 = \mathbf{20{,}01}$$

Al estar comprendidos dentro del intervalo definido por los límites de tolerancia, los límites de control anteriormente calculados serán los que se utilicen para controlar el proceso productivo en estudio, siempre que la precisión del mismo sea media, como se ha visto en este apartado. Para ver si cumple esta condición, se calcula el índice relativo de precisión, IRP = (LTS-LTI)/$\bar{R}$ (ver Apartado 12.6), que, sustituyendo los valores de este ejemplo, toma el valor IRP = (32-19)/4,34 = 3, lo que clasifica al proceso, según la Tabla 12.6, como de precisión media.

Si los LT hubiesen sido 33 y 17, el campo de tolerancias resultante sería de 16, lo que habría provocado que el IRP tuviera un valor de 16/4,34 = 3,69, clasificando, por tanto, al proceso en estudio como de alta precisión. Ello obligaría a utilizar para su control los límites de control modificados (LCM). Para este caso:

$$LCMS = LTS - F\bar{R} = 33 - 0{,}712 \times 4{,}34 = \mathbf{29{,}9}$$
$$LCMI = LTS + F\bar{R} = 17 + 0{,}712 \times 4{,}34 = \mathbf{20{,}09}$$

Cuando se controla un proceso con los límites mencionados, se dice que éste es estable cuando cumple las siguientes condiciones (Ozeki, 1992, pág. 220 y siguientes):

- No hay puntos fuera de los límites de control (si un punto está en el límite se considerará que está fuera de dicho límite).
- No hay una anomalía en la distribución de los puntos.

Si, además, un estado es «estable a un nivel deseable en la perspectiva de consideraciones técnicas y económicas» estaremos ante un estado controlado (JIS, 1981). En la Figura 12.24 se pueden apreciar una serie de ejemplos de estados de procesos.

[13] La construcción del gráfico representado sólo tiene un carácter ilustrativo, ya que **en esta fase sólo se realiza el cálculo de los LC**. A partir del momento en que el proceso se defina como válido, éstos se utilizarán para controlarlo.

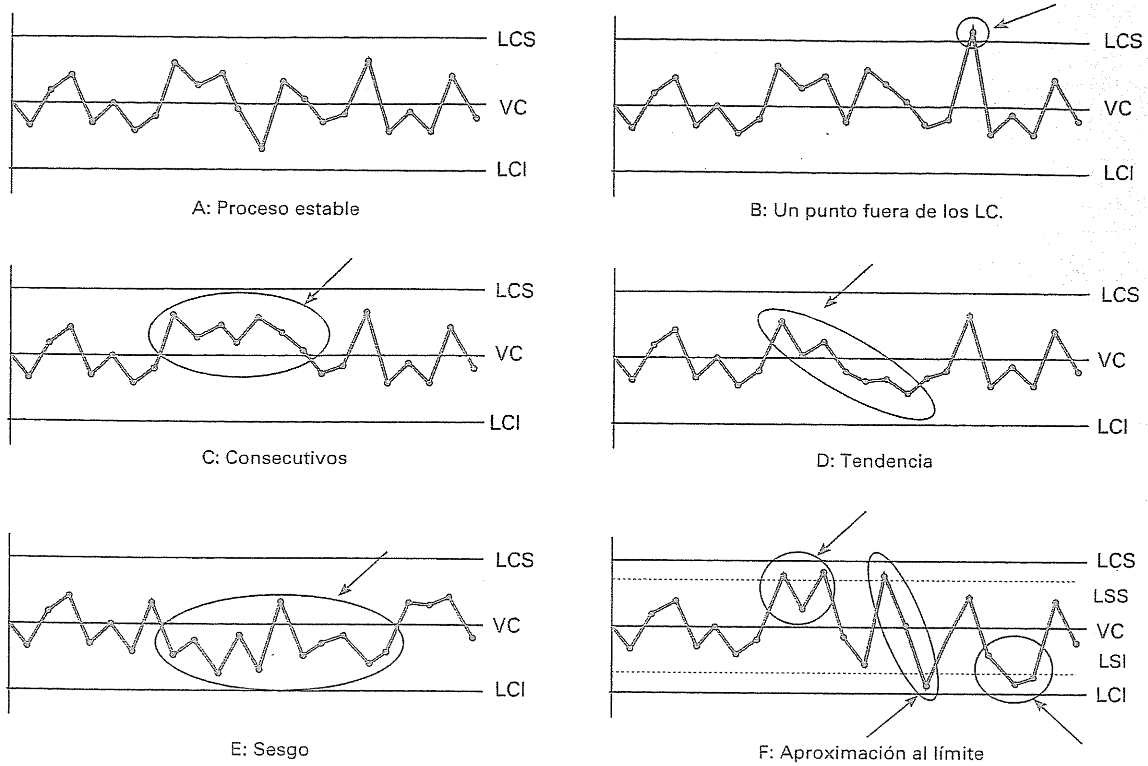


Figura 12.24. Distintos casos de proceso.

El caso A presenta un **estado estable**, es decir **bajo control**, donde los puntos van oscilando de una manera regular alrededor del valor central. Todos los demás son procesos **fuera de control** debidos a que existe una anomalía en la distribución de los puntos. El B refleja que un **punto** se ha **salido de los límites de control**, no debiendo ignorarse la causa que ha provocado esta situación. En la Figura C se puede apreciar que hay que regular el proceso, ya que siete puntos consecutivos han salido a un mismo lado del valor central, de lo que se puede deducir que la media ha sufrido un desplazamiento; a este fenómeno se le suele conocer como **consecutivos**. En D se muestra una **tendencia**, es decir, un ascenso (o caída) sostenido(a) en la posición de los puntos; si ésta se da en siete puntos consecutivos es señal de que existe una anomalía, por lo que habrá que parar el proceso y corregirlo. El caso E, conocido como **sesgo**, se produce cuando hay menos de siete puntos consecutivos a un mismo lado del valor central, pero la mayoría de los puntos están a ese mismo lado, pudiendo haber: 10 de 11 puntos consecutivos, 12 o más de 14 puntos consecutivos, 14 o más de 17 puntos consecutivos, 16 o más de 20 puntos consecutivos. Por último, la **aproximación al límite**, Figura F, se da cuando dos de tres puntos consecutivos se aproximan a los

límites de control, estando a más de dos tercios de la distancia entre el valor central y los límites de control[14].

Las grandes **ventajas** que tiene la utilización de estos gráficos es que **informan de los cambios de la media y dispersión** de la variable en tiempo real del proceso, pudiendo rectificarlo sin que se lleguen a producir elementos defectuosos. Son, además, muy **sensibles a cualquier cambio en el proceso**. Sin embargo, también tienen sus **inconvenientes**. Por una parte, su aplicación no suele estar al alcance de un operario normal, por lo que se requerirá un **adiestramiento especial**. Por otra, son **caros** al exigir operarios especializados, inspectores, papeleo, etc., y, además, provocan **malestar entre los operarios** por una falta de comprensión de los gráficos. Por ello, generalmente no entienden por qué el Control de Calidad les estrecha los límites establecidos en el plano, sin darse cuenta de que los límites de control no se refieren a valores individuales, sino a los de las medias muestrales. Por otra parte, no entienden por qué, a veces, tiene que parar el proceso y ajustar la máquina si las piezas que está obteniendo están dentro de los límites de tolerancia establecidos[15].

12.7.2. Gráficos de PRE-control

Debido a los inconvenientes que presentan los gráficos $\overline{X}$-R, cuando se permiten del 1 al 3 por 100 de productos defectuosos, se pueden utilizar los denominados gráficos de PRE-control, que se basan en los límites de tolerancia especificados para el producto. Para ello se tiene que cumplir, además, que la dispersión del proceso ($6\ \sigma'$) sea como máximo el 88 por 100 del campo de tolerancias (Juran y otros, 1990, pág. 743).

Esta técnica no requiere ningún cálculo a partir de datos históricos y sólo necesita tres ítems para dar información de control. El valor central será la media entre los límites de tolerancia, por lo que el valor nominal a conseguir tendrá que cumplir esta condición. Los límites de PRE-control se sitúan a una distancia de los límites de tolerancias iguales a un cuarto del campo de tolerancia (Figura 12.25).

El principio en el que se basa el PRE-control se demuestra suponiendo que se da la peor condición que puede aceptarse en un proceso capaz de lograr una

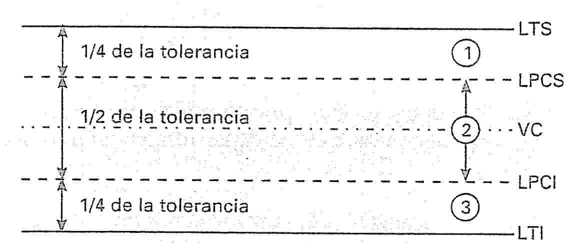


Figura 12.25. Situación de los límites de PRE-control.

[14] Como los límites de control están a una distancia de 3 σ del valor central, los dos tercios de esa distancia equivalen a 2 σ. Estas líneas, situadas a 2 σ del valor central, es lo que se conoce como línea de seguridad (o aviso) superior (LSS) y línea de seguridad inferior (LSI).

[15] Hay que hacer notar que los inconvenientes mencionados anteriormente han sido totalmente superados al aplicar la filosofía de los QCC, ya que uno de los puntos fundamentales en los que se basan es la formación de los operarios, que anularía todos esos problemas.

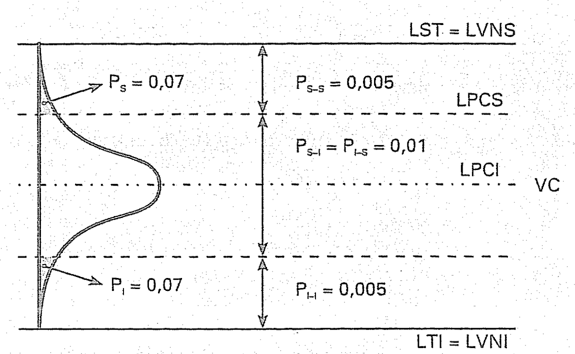


Figura 12.26. Distribución de probabilidades en la hipótesis de PRE-control.

determinada calidad, esto es, que los límites de variación natural coincidan con los límites de tolerancia (Figura 12.26); ello querría decir que si se produce un cambio en el valor medio, se comenzará a tener productos defectuosos.

Si los límites de tolerancia coinciden con los de variación natural se cumplirá que: LTS = LVNS = $\mu + 3\,\sigma'$ y LTI = LVNI = $\mu - 3\,\sigma'$. De acuerdo con ello, los límites de PRE-control se podrían expresar como:

$$\text{LPCS} = \mu + 1{,}5\,\sigma' \qquad \text{LPCI} = \mu - 1{,}5\,\sigma'$$

Al distribuirse según una normal, en el intervalo definido por estos límites estará el 86 por 100 de la población. Debido a ello y a la simetría de dicha distribución, la probabilidad de que salga un producto por encima del LPCS (P_S) coincide con la de que salga por debajo del LPCI (P_I), siendo ambas igual al 7 por 100. Las probabilidades de que salgan dos piezas consecutivas por encima del LPCS (P_{S-S}), por debajo del LPCI (P_{I-I}), o alternativamente por encima y por debajo (P_{S-I}) o viceversa (P_{I-S}), serán :

$$P_{S-S} = P_S \times P_S = 0{,}07 \times 0{,}07 = 0{,}0049 \approx 0{,}005 = 0{,}5\ \%$$
$$P_{I-I} = P_I \times P_I = 0{,}07 \times 0{,}07 = 0{,}0049 \approx 0{,}005 = 0{,}5\ \%$$
$$P_{S-I} = P_{I-S} = 2\,P_S \times P_I = 2 \times 0{,}07 \times 0{,}07 = 0{,}0098 \approx 0{,}01 = 1\ \%$$

Así pues, la probabilidad de que ocurra cualquiera de estos sucesos es muy pequeña, y, por tanto, la de parar la máquina para ajustarla, pues ésta es la medida que hay que tomar cuando suceda esto.

Si se cumplen las condiciones que se exigían al principio de centrado y de dispersión, esta técnica de PRE-control se puede resumir, utilizando para ello la Figura 12.25, en los siguientes pasos:

1. Con los LPC, se divide por zonas el campo de tolerancias.
2. Se comienza el trabajo.
3. Si la primera pieza está fuera de los límites de tolerancia se ajusta la máquina.
4. Si la primera pieza está dentro de los límites de tolerancia, pero fuera de uno de los límites de PRE-control (en 1 o en 3), se comprueba la siguiente pieza.
5. Si la segunda pieza está también en la misma zona que la anterior, se vuelve a ajustar la máquina.

6. Si la segunda pieza está también fuera de los límites de PRE-control, pero en la otra zona (3 o 1, respectivamente), habrá que tomar alguna medida para disminuir la dispersión que presenta el proceso.
7. Si la segunda pieza está dentro del intervalo definido por los LPC (zona 2), se continúa el proceso.
8. Cuando cinco piezas consecutivas están dentro de los LPC se aprueba la puesta en marcha, comprobando cada 25 piezas a partir de este momento. Si alguna de éstas se sale del intervalo de PRE-control, volver al punto 3.

12.8. GRAFICOS DE CONTROL POR ATRIBUTOS

En sentido estricto, un **atributo** es una característica de calidad que no puede ser medida; sólo se podrá observar (por ejemplo, roturas, grietas, etc.), clasificando al producto en defectuoso o bueno, dependiendo de que tenga o no dicha característica. Sin embargo, también hay muchas variables medibles que se pueden considerar como atributos, cuando no interesa su valor, sino sólo conocer si está dentro de un determinado intervalo. Por ejemplo, si en la medida del diámetro de la Figura 12.18 consideramos la pieza aceptable o no, según se encuentre, dentro o fuera del campo de tolerancia. De hecho en la práctica, los gráficos $\overline{X}$ y R se utilizan para controlar características que se consideran de gran importancia; el resto se engloba como atributos, controlándolos mediante algún gráfico específico para ello.

Los objetivos de los gráficos de control por atributos pueden concretarse en los siguientes puntos (J. A. D. Machuca y otros, 1990, pág. 597):

- Estudiar si la marcha del proceso está bajo control de forma menos costosa que con los gráficos de control por variables.
- Obtener un nivel de calidad aceptable de acuerdo con los objetivos fijados.
- Poner de manifiesto aquellas características que, por razones económicas y/o técnicas, deberían ser controladas mediante gráficos de control por variables.

Al utilizar estos gráficos se clasifican las piezas en **aceptables**, si **no tienen ningún defecto, y no aceptables, si tienen alguno**. Dado que el producto defectuoso puede tener uno o más defectos, se tiene la opción de controlar el número de defectos o el número de productos defectuosos. En ambos casos, el estudio se hará mediante muestras, que podrán ser de tamaño constante o variable, lo cual genera los cuatro tipos de gráficos que aparecen en la Tabla 12.9. Todos ellos se basan en definir unos límites de control a una distancia de 3 σ de su valor central, que será la media de lo que se quiera controlar. Su fórmula genérica es LC = = VC $\pm$ 3 σ.

El control del proceso se hará de forma análoga a como se exponía para los gráficos $\overline{X} - R$, pero es conveniente hacer notar que aquí los valores que se

Tabla 12.9. Tipo de gráficos de control por atributos (J. A. D. Machuca y otros, 1990, pág. 598)

Tamaño de la muestra / Base de control	Constante	Variable
Número de piezas defectuosas	Gráfico np	Gráfico p
Número de defectos	Gráfico c	Gráfico u

obtengan por encima de los LCS tienen un significado muy diferente de los que aparezcan bajo los LCI. Mientras que los primeros están detectando un exceso de defectos (o, en su caso, de piezas defectuosas), los segundos ponen de manifiesto que las muestras tomadas revelan valores muy bajos en defectos (o, en su caso, de productos no aceptables). A pesar de que esto último podría llevar a pensar que se está ante un buen resultado, lo que generalmente sucede es que las muestras pueden estar extrayéndose de forma inadecuada, por lo que habría que analizar la forma de la extracción. En el caso de que no sea ésta la causa, estaremos ante un proceso que ha evolucionado favorablemente, por lo que habría que readaptar los LC.

En lo referente a las muestras que deben tomarse periódicamente, deben ser de mayor tamaño que las utilizadas para los gráficos de control por variables, no debiendo ser menores que 50 unidades y aconsejándose un tamaño promedio de 100 (J. A. D. Machuca y otros, 1990, pág. 598).

12.8.1. Gráfico *p*

Sirve para controlar el número de ítems defectuosos utilizando muestras de tamaño variable. Si dividimos dicho número por el tamaño de la muestra **n**, obtendremos la **fracción de defectuosos** de la misma, la cual se denomina **p**. El valor central del gráfico *p* tendría que ser la fracción de defectuosos del universo, *p*, que al no ser conocida se estima mediante la media de las fracciones defectuosas, $\bar{p}$. El cálculo de esta última se puede realizar como la media de las *p* calculadas[16] o bien dividiendo el número de artículos defectuosos obtenidos en un período mínimo de un mes entre el número de piezas inspeccionadas en el mismo.

La variable *p* se distribuye según una binomial (Montgomery, 1991, págs. 29 y 104), por lo que su desviación típica y los correspondientes límites de control se pueden expresar como:

$$\sigma_p = \sqrt{\bar{p}(1 - \bar{p})/n} \qquad LC = \bar{p} \pm 3\sqrt{\bar{p}(1 - \bar{p})/n}$$

Nótese que los límites de control variarán, pues dependen de *n*, y ésta no es constante. Ello obligará a calcular los LC para cada una de las muestras. Este problema lo suelen resolver muchos autores tomando un tamaño medio de éstas y obteniendo unos **límites de control simplificados**, basándose en que no se incurre en un gran error al ser *n* un número relativamente elevado. En caso de que se opte por esta simplificación, habrá que **vigilar los puntos** que se obtengan **próximos** a dichos límites de control simplificados, ya que se pueden dar casos análogos a los representados en la Figura 12.27, en los cuales es conveniente calcular el límite de control real para cada uno de estos puntos.

A) El punto está bajo control con respecto a los LC simplificados, pero fuera de control si se hubieran utilizado los LC reales. Esto es debido a que la muestra estudiada es de un tamaño superior a la media, por lo que el intervalo definido por los límites de control reales es inferior al determinado por los simplificados.

[16] Para poder hacer esta estimación se tendrán que utilizar de 20 a 25 muestras. Yu Chuen-Tao (1969, pág. 78).

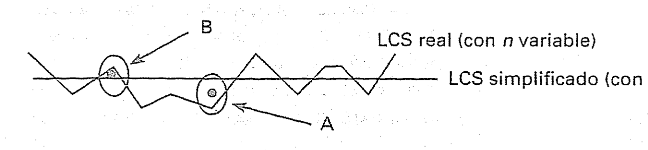


Figura 12.27. Situación relativa de los puntos con respecto a los LC.

B) Es el caso opuesto al anterior; el punto está fuera de control si la base son los LC simplificados y bajo control si se utilizan los LC reales. La muestra utilizada aquí es de menor tamaño que la media, razón por la que el espacio entre los LC reales es mayor que el correspondiente entre los simplificados.

A veces el valor central empleado no es el deducido con los datos históricos, sino un valor estándar propuesto para *p'*. En este caso, la existencia de puntos fuera de control puede ser debida a alguna causa asignable a la fabricación o a un nivel de calidad real diferente al estándar fijado. En ambos casos suele continuarse con el gráfico de control, sin tener en cuenta los límites, hasta que la situación pueda ser mejorada.

También puede ocurrir que, utilizando el valor estándar de *p'*, el gráfico muestre que el proceso está bajo control, pero que la fracción defectuosa media, $\bar{p}$, que se va obteniendo, es sensiblemente mayor o menor que la *p'* propuesta. En el primer caso, es aconsejable tomar la $\bar{p}$ como valor central a fin de evitar que los operarios crean que se les impone un nivel de calidad prácticamente inalcanzable. El segundo caso puede ser indicativo de que se ha logrado una mejora permanente de la calidad, por lo que, como se dijo al principio del Apartado 12.8, habría que adoptar unos nuevos valores para los LC y ajustar el valor central, de acuerdo con la citada $\bar{p}$.

12.8.2. El gráfico *np*

Este es prácticamente igual al anterior y es aplicable todo lo expuesto en el Apartado 12.8.1. La diferencia es que las muestras son de un tamaño constante, *n*, por lo que reduce los inconvenientes que presentaba el *p* con respecto a los límites de control. Su **valor central** es el **número de artículos defectuosos.** Si $\bar{p}$ es la proporción media de éstos, multiplicando por *n* se tendrá el valor medio buscado (ver apartado anterior). Para esta variable, $n\bar{p}$, la desviación típica y los correspondientes límites de control son (Montgomery, 1991, pág. 29):

$$\sigma_{np} = \sqrt{n\bar{p}(1 - \bar{p})} \qquad LC_{np} = n\bar{p} \pm 3\sqrt{n\bar{p}(1 - \bar{p})}$$

12.8.3. Gráfico *c*

Este gráfico sirve para controlar el proceso productivo mediante el conocimiento del **número de defectos** que aparece **en una muestra**, obtenido éste como la suma de todos los defectos que tengan las piezas que lo componen. El gráfico *c* es empleado principalmente cuando el número de posibles defectos es elevado o cuando se desea aislar un cierto tipo de ellos. En estos casos, la clasificación de artículos en aceptables y no aceptables es insuficiente para indicar la evolución de la calidad efectiva de la producción.

Dado que se considera la existencia de una gran cantidad de posibles defectos por artículo, una probabilidad relativamente baja de que se den un defecto e independencia de sucesos en los distintos artículos, la binomial que regía el número total de defectos tiende a una distribución de Poisson, en la que la desviación típica puede expresarse como:

$$\sigma = \lim_{\substack{n \to \infty \\ p' \to 0}} \sqrt{np'(1 - p')} = \lim_{\substack{n \to \infty \\ p' \to 0}} \sqrt{np'} = \sqrt{c'}$$

donde c' es el número más probable de defectos por muestra. De acuerdo con lo anterior, los límites de control se pueden expresar como:

$$LC = \bar{c} \pm 3\sqrt{\bar{c}}$$

Donde c' ha sido sustituido por la media de defectos por muestra, $\bar{c}$, que se calculará dividiendo el número total de defectos encontrados en un lote de muestras entre el número de éstas, el cual no debe ser inferior a 25. Cabe comentar que, en el presente caso, la muestra puede tener un tamaño más reducido, pues, de hecho, cada unidad a controlar puede llevar un número relativamente elevado de posibles defectos. En cualquier caso, el valor de n debe ser sensiblemente constante si se desea llegar a valores comparables.

12.8.4. Gráfico *u*

Si se cumplen las hipótesis empleadas para el gráfico *c*, pero las muestras no pueden ser elegidas de tamaño constante, no se podrá trabajar con el número de defectos por muestra, *c*, sino que se tendrá que utilizar el número de defectos por productos, *u*. La relación que existe entre estas variables es obvia por definición:

$$u = c/n$$

Deduciendo los límites de control a partir de los definidos para el gráfico *c* se obtendrá:

$$LC = \bar{c} \pm 3\sqrt{\bar{c}/n} = \bar{u} \pm 3\sqrt{\bar{u}/n}$$

Lo mismo que ocurría en el gráfico *p*, los límites de control son variables. De la misma forma que en éste, se puede adoptar, en ocasiones, un tamaño medio de la muestra y fijar así los límites de control, evitando el cálculo de los mismos para cada muestra. Lo mismo que en el gráfico *p*, ello no debe hacerse en los casos en que los valores de *u* estén muy cerca y/o fuera de dichos límites.

12.9. MUESTREO DE ACEPTACION DE LOTES POR ATRIBUTOS

Para llevar a cabo la función de producción, la empresa tiene que consumir una serie de elementos procedentes del exterior que van a tener una gran repercusión en la calidad del producto (materias primas, productos semielaborados, componentes, etc.). Será, pues, de vital importancia comprobar que estos elementos

cumplen un mínimo nivel de calidad, para así poder asegurar el de la producción que se va a llevar a cabo con ellos. Este es uno de los motivos por el que es muy útil el control de calidad global de la empresa (CWQC), que implique controlar la calidad en los procesos productivos de los proveedores. Sin embargo, como se dijo en Apartado 12.2, sólo las grandes compañías tienen medios para realizarlo; generalmente esto no será posible, por lo que se tendrá que verificar si estos elementos «exteriores» cumplen el nivel mínimo exigido.

Si se puede hacer una inspección al 100 por 100, es decir, examinar uno a uno los artículos que componen el lote, eliminando los que sean defectuosos y devolviéndolos al proveedor, se garantizará un alto nivel de calidad (ningún defectuoso). Pero no es éste el caso habitual, ya que habrá ocasiones que será imposible su realización; por ejemplo, cuando la prueba a experimentar es destructiva o muy costosa su ejecución con relación al valor obtenido (el elemento en cuestión no tiene una gran importancia para la calidad del producto final y su inspección requiere mucho tiempo). Resumiendo, el muestreo de aceptación es útil cuando:

- La prueba es destructiva.
- El coste de la inspección al 100 por 100 es muy elevado.
- El número de artículos a inspeccionar es muy elevado, por lo que el error que se puede cometer al llevar a cabo una inspección al 100 por 100[17] puede ser mayor que el que pudiera dejar pasar un plan de muestreo.
- El historial de calidad del proveedor es bueno.

Si se compara el muestreo de aceptación con la inspección al 100 por 100 se puede decir que el primero presenta una serie de ventajas frente al segundo, entre ellas:

- Es más barato, ya que requiere menos inspecciones.
- Hay un menor contacto con el elemento a inspeccionar, por lo que se reducen los daños que se puedan ocasionar.
- Se pueden realizar ensayos destructivos.
- Menor número de inspectores.
- El rechazo de lotes completos, en vez de la devolución de los artículos defectuosos, constituye una motivación para que el proveedor mejore su calidad.

Pero también tiene sus inconvenientes; entre ellos:

- Existe el riesgo de aceptar lotes «malos» y rechazar «buenos».
- Se necesita una serie de cálculos y documentación (ver apartados siguientes) no necesarios en la inspección al 100 por 100.

Como los gráficos de control, los planes de muestreo pueden ser por variables y por atributos, pero dado que los primeros se pueden considerar como atributos (ver Apartado 12.8) sólo se estudiará en este capítulo este último caso. Dependiendo de cómo se realicen pueden ser simples, dobles, múltiples y secuenciales, pero se pueden diseñar de tal forma que se obtenga con ellos resultados equivalentes, es decir, que un lote, con una calidad determinada, tenga exactamente la misma probabilidad de aceptación con cualquiera de los cuatro tipos de planes de muestreo, por lo que la elección de uno u otro se deberá prácticamente a factores como eficacia administrativa, tipo de información producida por el plan, etc.

[17] En estas condiciones, la monotonía de la operación de inspección hace que el inspector se relaje en su labor, dejando pasar artículos defectuosos.

12.9.1. Plan de muestreo simple por atributos

Se tomará una muestra aleatoria de n unidades del lote y, si ésta contiene como máximo un número determinado de defectuosos, conocido como **número de aceptación** (c[18]), se aceptará aquél; en caso contrario, se rechaza el lote completo. La probabilidad de aceptar el lote con estas condiciones va a depender de la **fracción de defectuosos**, ω[19], que contenga. Así pues, definido un plan de muestreo simple en el que la muestra sea de tamaño n y un número de aceptación c, para un lote de tamaño N con una determinada ω_j, dicha probabilidad $P_a(\omega_j)$ se puede expresar como:

$$P_a(\omega_j) = \sum_{i=0}^{c} P_a(i) = \sum_{i=0}^{c} (C_i^{\omega_j N}\, C_{(n-i)}^{(1-\omega_j)N} / C_n^N)$$

Donde $P_a(i)$ es la probabilidad de que aparezcan «i» defectuosos en la muestra y C_n^N el número de combinaciones posibles de N piezas tomadas de n en n, que es igual a:

$$C_n^N = N!/n!\,(N - n)!$$

Análogamente,

$$C_i^{\omega_j N} = \frac{(\omega_j\, N)!}{i!(\omega_j\, N - i)!}\ , \quad C_{(n-i)}^{(1-\omega_j)N} = \frac{[(1 - \omega_j)N]!}{(n - i)!(N - \omega_j\, N - n + i)!}$$

En las fórmulas anteriores, los símbolos y expresiones tienen el siguiente significado:

- ω_j: Fracción defectuosa del lote.
- N: Tamaño del lote.
- $\omega_j N$: Número de defectuosos en el lote.
- $(1 - \omega_j)N$: Número de artículos buenos en el lote.
- n: Tamaño de la muestra.
- i: Número de defectuosos en la muestra.
- $n - i$: Número de artículos buenos en la muestra.
- c: Número de aceptación.

Nótese que la probabilidad se calcula para una determinada fracción de defectuosos, ω_j, que no se conoce. Por lo que tendrá un valor diferente para cada ω_j. Si se calculan dichos valores, obtendremos los puntos de la **curva de operaciones**[20] (**CO**), que aparece en la Figura 12.28. Un plan de muestreo que discriminara perfectamente los lotes «buenos» y los «malos», tendría una CO como la de la Figura 12.29. Esta función es horizontal, con una probabilidad de aceptación igual a 1 hasta llegar a la fracción de defectuosos ω_k, que se considera que hará «malo» al lote, por lo que caerá verticalmente hasta el 0, por ser la probabilidad de aceptar lotes con una $\omega > \omega_k$.

Teóricamente, la curva de la Figura 12.29 representaría una inspección al 100 por 100, pero ni dicha inspección puede garantizar un resultado así, que implica rechazar los lotes con una fracción de defectuosos superior a una determinada. Sí es posible, sin embargo, acercarse a esta curva ideal aumentando el tamaño de la muestra y proporcionalmente el número de aceptación. El efecto de esto aparece en la Figura 12.30.

[18] También conocido como «A» (J. A. D. Machuca, 1990, pág. 575).
[19] Esta se corresponde con el np visto en el Apartado 12.8.2 y el d en el 2.A.5.
[20] Algunos autores la denominan **curva característica de operaciones**.

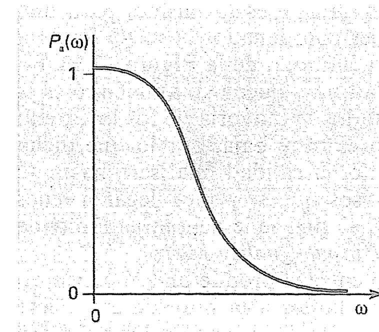


Figura 12.28. Curva CO.

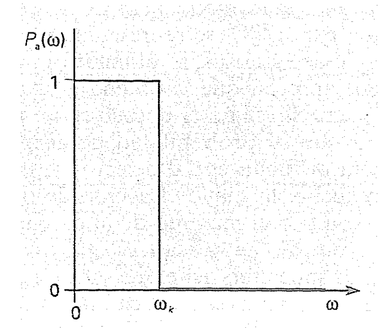


Figura 12.29. Curva CO ideal.

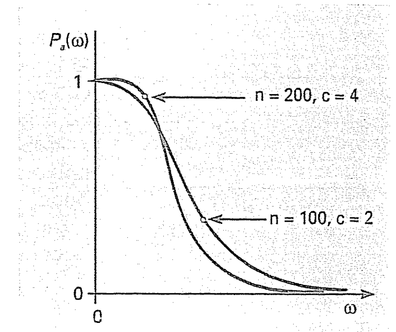


Figura 12.30. Sensibilidad de la curva CO a variaciones conjuntas en n y c.

Cuando un lote es rechazado, se suele aplicar una acción correctiva. Generalmente el lote es devuelto al proveedor e inspeccionado por éste al 100 por 100 siendo restituido con 0 defectos, lo cual se conoce como **programa de acción rectificadora**. Esto tiene un efecto psicológico sobre el proveedor, lo hace responsable de una calidad deficiente y se puede ejercer presión sobre él para que mejore sus procesos de fabricación o instale mejores controles para los procesos. Pero desde el punto de vista del consumidor, tiene una gran ventaja, pues consigue bajar el nivel medio de defectuosos. Para analizar esta ventaja utilizaremos la Figura 12.31.

Definido el plan de muestreo, si los lotes llegan a recepción con una determinada fracción de defectuosos, ω, la probabilidad de aceptarlos será $P_a(\omega)$. Por tanto, será rechazado un porcentaje igual a $1 - P_a(\omega)$, que tendrá que ser inspeccionado al 100 por 100, restituyéndose los productos defectuosos por buenos y reenviándolos de nuevo, ya con una fracción de defectuosos nula. Por lo tanto, la fracción de defectuosos real que se consigue será la suma ponderada de ambas entradas al almacén, lo que se conoce como **calidad promedio de salida** (**AOQ**, *Average Output Quality*), tendrá un valor:

$$AOQ = \omega \times P_a(\omega) + 0 \times [1 - P_a(\omega)] = \omega \times P_a(\omega)$$

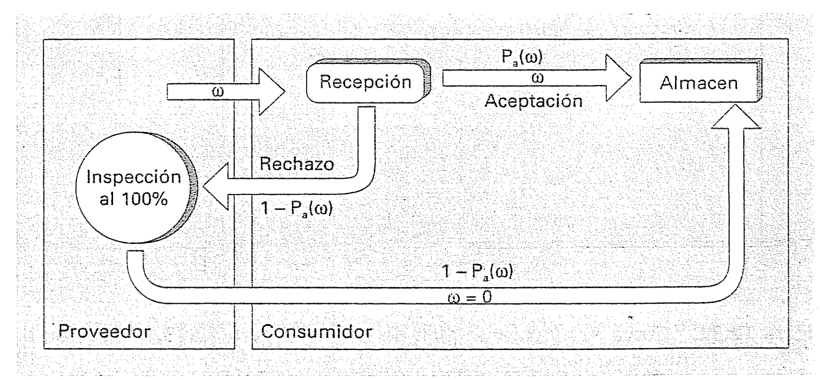


Figura 12.31. Esquema de inspección rectificadora.

Si para un determinado plan de muestreo o, lo que es lo mismo, para una determinada curva CO, se representa en unos ejes coordenados la AOQ frente a la fracción de defectuosos, se obtendrá una curva como la de la Figura 12.32. En ella se puede apreciar que se obtendrá una calidad muy buena si también lo es la de llegada, pero si ése no es el caso serán rechazados la mayoría de los lotes; ello es debido a que su probabilidad de aceptación es muy baja, por lo que dicha mayoría será devuelta con 0 defectos y, por tanto, la calidad final será bastante buena. De hecho, la mayor fracción de defectuosos que se podrá llegar a tener viene marcada por el máximo de la curva AOQ, al cual se le denomina **límite de la calidad promedio de salida** (AOQL, *Average Output Quality Limit*).

El plan de muestreo tiene que ser un acuerdo entre el productor y el consumidor, existiendo dos niveles de calidad muy importantes a la hora de establecer dicho plan de muestreo. El fabricante querrá que no le devuelvan los lotes si éstos tienen una fracción defectuosa menor que un nivel dado, al cual se conoce como **Nivel Aceptable de Calidad** (NAC). Del mismo modo, el consumidor no estará dispuesto a aceptar lotes con una fracción de defectuosos superior a un cierto límite, al cual se denomina **Nivel Tolerable de Defectuosos** (NTD). Sin embargo, siempre existirá la probabilidad de aceptar lotes con un nivel de defectuosos superior a NTD y de rechazarlos con un nivel inferior a NAC (ver la Figura 12.33), pues ello dependerá de la suerte que se tenga al extraer la muestra del lote. Así, el máximo **riesgo** que corre el **consumidor** de aceptar lotes con un nivel de defectuosos superior a NTD será justamente $P_a(\omega = \text{NTD})$, que se suele representar con la letra β; de igual forma el **riesgo del fabricante** (de devolución de lotes con una fracción de defectuosos inferior a NAC) será justamente $1 - P_a(\omega = \text{NAC})$, conocido como α.

Una vez establecidos el α, el β, el NAC y el NTD, se puede definir perfectamente el plan de muestreo. Este se podría elaborar directamente a partir de la ecuación de aceptar un determinado lote, pero sería excesivamente engorroso, por lo que suele hacerse a través de la utilización de un nomograma binomial (ver Montgomery, 1991, pág. 316) o bien a partir de unas tablas del tipo de la 12.10. El Ejemplo 12.4 contempla esta última opción.

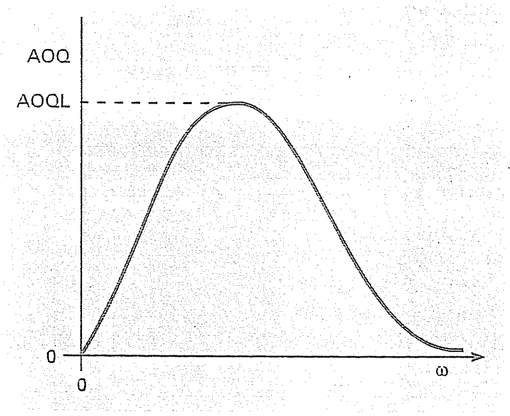


Figura 12.32. Curva AOQ para un plan de muestreo dado.

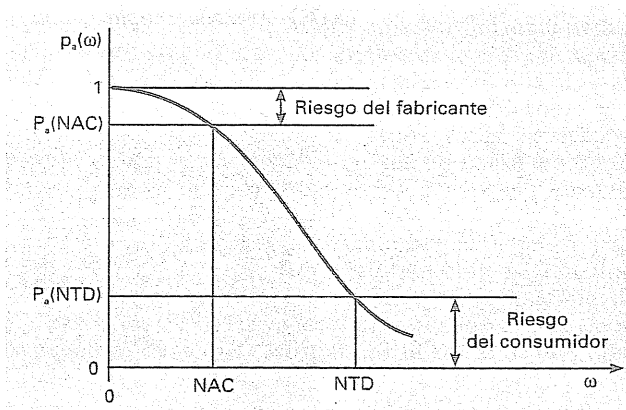


Figura 12.33. Situación de los niveles NAC y NTD en la curva CO.

Tabla 12.10. Tabla para la construcción de un plan de muestreo

A					B				
Valores de NTD/NAC para:					Valores de NTD/NAC para:				
c	$\alpha = 0{,}05$ $\beta = 0{,}10$	$\alpha = 0{,}05$ $\beta = 0{,}05$	$\alpha = 0{,}05$ $\beta = 0{,}01$	nNAC	c	$\alpha = 0{,}01$ $\beta = 0{,}10$	$\alpha = 0{,}01$ $\beta = 0{,}05$	$\alpha = 0{,}01$ $\beta = 0{,}01$	nNAC
0	44,890	58,404	89,781	0,052	0	229,105	298,073	458,210	0,010
1	10,946	13,349	18,681	0,355	1	26,184	31,933	44,686	0,149
2	6,509	7,699	10,280	0,818	2	12,206	14,439	19,278	0,436
3	4,890	5,675	7,352	1,366	3	8,115	9,418	12,202	0,823
4	4,057	4,646	5,890	1,970	4	6,249	7,156	9,072	1,279
5	3,549	4,023	5,017	2,613	5	5,195	5,889	7,343	1,785
6	3,206	3,604	4,435	3,286	6	4,520	5,082	6,253	2,330
7	2,957	3,303	4,019	3,981	7	4,050	4,524	5,506	2,906
8	2,768	3,074	3,707	4,695	8	3,705	4,115	4,962	3,507
9	2,618	2,895	3,462	5,426	9	3,440	3,803	4,548	4,130
10	2,497	2,750	3,265	6,169	10	3,229	3,555	4,222	4,771
11	2,397	2,630	3,104	6,924	11	3,058	3,354	3,959	5,428
12	2,312	2,528	2,968	7,690	12	2,915	3,188	3,742	6,099
13	2,240	2,442	2,852	8,464	13	2,795	3,047	3,559	6,782
14	2,177	2,367	2,752	9,246	14	2,692	2,927	3,403	7,477
15	2,122	2,302	2,665	10,035	15	2,603	2,823	3,269	8,181
16	2,073	2,244	2,588	10,831	16	2,524	2,732	3,151	8,895
17	2,029	2,192	2,520	11,633	17	2,455	2,652	3,048	9,616
18	1,990	2,145	2,458	12,442	18	2,393	2,580	2,956	10,346
19	1,954	2,103	2,403	13,254	19	2,337	2,516	2,874	11,082
20	1,922	2,065	2,352	14,072	20	2,287	2,458	2,799	11,825
21	1,892	2,030	2,307	14,894	21	2,241	2,405	2,733	12,574
22	1,865	1,999	2,265	15,719	22	2,200	2,357	2,671	13,329
23	1,840	1,969	2,226	16,548	23	2,162	2,313	2,615	14,088
24	1,817	1,942	2,191	17,382	24	2,126	2,272	2,564	14,853
25	1,795	1,917	2,158	18,218	25	2,094	2,235	2,516	15,623
26	1,775	1,893	2,127	19,058	26	2,064	2,200	2,472	16,397
27	1,757	1,871	2,098	19,900	27	2,035	2,168	2,431	17,175
28	1,739	1,850	2,071	20,746	28	2,009	2,138	2,393	17,957
29	1,723	1,831	2,046	21,594	29	1,985	2,110	2,358	18,742
30	1,707	1,813	2,023	22,444	30	1,962	2,083	2,324	19,532
31	1,692	1,796	2,001	23,298	31	1,940	2,059	2,293	20,324
32	1,679	1,780	1,980	24,152	32	1,920	2,035	2,264	21,120
33	1,665	1,764	1,960	25,010	33	1,900	2,013	2,236	21,919
34	1,653	1,750	1,941	25,870	34	1,882	1,992	2,210	22,721
35	1,641	1,736	1,923	26,731	35	1,865	1,973	2,185	23,525
36	1,630	1,723	1,906	27,594	36	1,848	1,954	2,162	24,333
37	1,619	1,710	1,890	28,460	37	1,833	1,936	2,139	25,143
38	1,609	1,698	1,875	29,327	38	1,818	1,920	2,118	25,955
39	1,599	1,687	1,860	30,196	39	1,804	1,903	2,098	26,770
40	1,590	1,676	1,846	31,066	40	1,790	1,887	2,079	27,587
41	1,581	1,666	1,833	31,938	41	1,777	1,873	2,060	28,406
42	1,572	1,656	1,820	32,812	42	1,765	1,859	2,043	29,228
43	1,564	1,646	1,807	33,686	43	1,753	1,845	2,026	30,051
44	1,556	1,637	1,796	34,563	44	1,742	1,832	2,010	30,877
45	1,548	1,628	1,784	35,441	45	1,731	1,820	1,994	31,704

EJEMPLO 12.4. Determinación de un plan de muestreo simple

Se quiere definir un plan de muestreo simple de aceptación para inspeccionar lotes de 10.000 unidades que garantice un riesgo $\alpha = 1$ por 100 para el fabricante y un $\beta = 5$ por 100 para el consumidor. El nivel aceptable de calidad (NAC) y el tolerable de defectuosos (NTD) acordados son del 1 y del 3 por 100, respectivamente.

Como el riesgo del fabricante es $\alpha = 0{,}01$, se buscarán los valores necesarios en el cuerpo B de la Tabla 12.10, que contiene el mencionado riesgo. Las columnas centrales contienen el valor del cociente NTD/NAC; en este caso será de $3/1 = 3$, a localizar en la columna correspondiente al $\beta = 0{,}05$, que es el riesgo del consumidor. Al no encontrarse dicho valor se tendrá que optar por uno de los dos más próximos, es decir 3,047 o 2,927. Cada uno de ellos definirá un plan diferente, que denominaremos 1 y 2, respectivamente.

PLAN 1: Si se elige 3,047 el número de aceptación (c, primera columna del cuerpo B) será de 13 y el producto $n \cdot$ NAC es 6,782 (última columna). Como NAC es 0,01, se puede deducir el tamaño de la muestra $n = n \cdot \text{NAC}/\text{NAC} = 6{,}782/0{,}01 = 678{,}2 \approx 678$. Luego el plan de muestreo sería sacar una muestra de 678 unidades y rechazar el lote si el número de defectuosos que contiene dicha muestra es superior a 13.

PLAN 2: el proceso será idéntico pero partiendo del 2,927, que se corresponde con un $n \times$ NAC de 7,477, luego el tamaño de la muestra sería: $n = 7{,}477/0{,}01 = 747{,}7 \approx 748$, y el c correspondiente de 14.

El consumidor apostará por el plan 2, ya que la fracción muestral de defectuosos (c/n) permitida por éste es menor que la del 1; como es lógico al fabricante le interesará siempre el contrario por la razón inversa.

12.9.2. Planes de muestreo dobles, múltiples y secuenciales

Un plan de **muestreo doble** es un procedimiento en el que en ciertas circunstancias es necesaria una segunda muestra antes de aceptar el lote. Estos planes se definen mediante cuatro parámetros:

- n_1, Tamaño de la primera muestra.
- c_1, Número de aceptación de la primera muestra.
- n_2, Tamaño de la segunda muestra.
- c_2, Número de aceptación para la combinación de las dos muestras combinadas.

El proceso a seguir es el siguiente: se saca la primera muestra de tamaño n_1. Si el número de defectuosos es menor o igual que c_1, se acepta el lote; si es igual o mayor que c_2, se rechaza; si está entre c_1 y c_2, se saca una segunda muestra de tamaño n_2. A partir de ahí se obtiene el número de defectuosos que hay en $n_1 + n_2$; si este número es menor o igual que c_2 se acepta el lote y si es mayor se rechaza.

Este tipo de muestreo tiene la ventaja, frente al simple, de que la inspección de las muestras puede ser más barata, ya que éstas suelen ser más pequeñas; como desventajas requieren una mayor carga administrativa.

El **muestreo múltiple** es una ampliación del doble, donde, para cinco muestras, se define el tamaño, n_i, un número de aceptación, c_i, y un número de rechazo, z_i. Se comienza igual que en el muestreo doble: se obtiene una muestra de tamaño n_1; si el número de defectuosos es menor o igual que c_1, se acepta el lote; si es mayor que z_1, se rechaza, y si está comprendido entre ambos, se saca una segunda muestra de tamaño n_2. Si el número de defectuosos que existe en $n_1 + n_2$ es inferior o igual a c_2, se acepta el lote; si es superior a z_2, se rechaza, y si está comprendido entre c_2 y z_2, se saca otra muestra de tamaño n_3. Este se añade a los productos que ya se tenía, formando el grupo $n_1 + n_2 + n_3$ ..., siguiéndose este proceso, si es necesario, hasta llegar a la extracción de la quinta muestra, donde se tomaría la decisión final.

La ventaja de este tipo de muestreo, frente al simple o al doble, es que las muestras necesarias son de menor tamaño, lo que supondrá un ahorro en la inspección. Sin embargo, al igual que pasaba con el doble con respecto al simple, éste requiere una administración bastante más complicada que los anteriores.

El **muestreo secuencial** es una extensión del concepto de muestreo doble y múltiple. Se podría decir que es como el múltiple pero con un número indeterminado de muestras, pudiéndose llegar teóricamente a inspeccionar el lote al 100 por 100, aunque en la práctica se suele parar cuando el número de artículos inspeccionados es igual al triple del tamaño de la muestra que se utilizaría en un plan de muestreo simple que ofreciera las mismas garantías. Generalmente se realiza mediante un gráfico como el representado en la Figura 12.34, donde se trazan dos líneas, la de aceptación y la de rechazo, y se va dibujando una línea quebrada que representa el número de defectuosos que va apareciendo en las muestras acumuladas. Si esta línea corta a la de aceptación se acepta el lote (que es lo que ocurre en la mencionada gráfica), y si cruza la de rechazo, se rechaza. En el caso de que se quede en la zona intermedia, se siguen sacando muestras hasta que se llegue a la cifra anteriormente mencionada (el triple de la muestra de un muestreo simple).

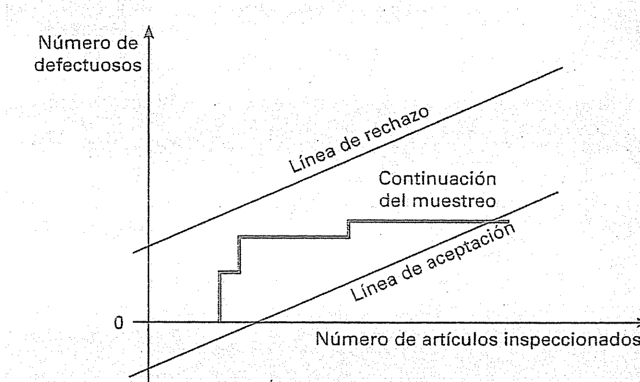


Figura 12.34. Funcionamiento del gráfico de muestreo secuencial.

REFERENCIAS Y BIBLIOGRAFIA

CHAUVEL, A. M.: «Résoudre un Problème», Dunod, 1992.

COLE, R. E.: «The Quality Revolution», *Production and Operations Management*, vol. 1, núm. 1 (págs. 118-120), 1992.

DOUCHY, J. M.: «Vers le "Zéro Défaut" dans l'entreprise», Bordas, 1987.

DRUCKER, P. E.: «The Emerging Theroy of Manufacturing», en «The new Manufacturing», Harvard Business Review, núm. 90080, 1991.

DUNCAN, A. J.: «Control de Calidad y estadística industrial», Alfaomega, 1989.

ERNST & YOUNG: «Calidad Total», TGP, Tecnologías de Gerencia y Producción, 1991.

FEA, H.: «Hacia un nuevo concepto de empresa occidental», Marcombo, 1993.

FUENTE GONZÁLEZ, F., y otros: «Temas Actuales de Gestión de Empresas», Publicaciones del C. U. R., 1980.

GARBIN, M., e INVREA, G.: «El Control de Calidad», Deusto, 1979.

GITLOW, H. S.: «Planificando para la Calidad», Ventura Ediciones, 1991.

HARRINGTON, H. J.: «El Coste de la Mala Calidad», Díaz de Santos, 1990.

HASEN, B. L.: «Control de Calidad», Hispano Europea, 1980.

ISHIKAWA, K.: «Práctica de los Círculos de Control de Calidad», TGP - Tecnologías de Gerencia y Producción, 1989.

JIS (*Japanese Industrial Standard» Z 8101-1981*), «Glosario de términos empleados en Control de Calidad», 1981.

JURAN, J. M.: «Juran y el liderazgo para la calidad», Díaz de Santos, 1990.

JURAN, J. M.; GRYNA, F. M., y BINGHAM, R. S.: «Manual de Control de Calidad», Reverté, 1990.

KUME, H.: «Herramientas Estadísticas Básicas para el Mejoramiento de la Calidad», Parramón, 1992.

LABOUCHEIX, V., y otros: «Tratado de la Calidad Total», tomos 1 y 2, C. D. N., Ciencias de la Dirección, 1992.

LOURENÇO, R.: «Control Estadístico de Calidad», Paraninfo, 1969.

MACHUCA, J. A. D.; DURBÁN, S., y MARTÍN, E.: «El Subsistema Productivo de la Empresa», Pirámide, 1990.

MACHUCA, J. A. D.; GARCÍA, S.; DOMÍNGUEZ, M. A.; RUIZ, A., y ALVAREZ, M. J.: «Aspectos estratégicos y nuevos desarrollos en la Dirección de Operaciones», McGraw-Hill, 1994.

MIZUNO, S.: «La Calidad Total en la Empresa», TGP, Tecnologías de Gerencia y Producción, 1989.

MONTGOMERY, D. C.: «Control Estadístico de la Calidad», Grupo Editorial Iberoamérica, 1991.

OZEKI, K.: «Manual de Herramientas de Calidad», TGP, Tecnologías de Gerencia y Producción, S. A., 1992

PEÑA, D., y PRAT, A.: «Cómo Controlar la Calidad», Instituto de la Pequeña y Mediana Empresa Industrial, 1990.

SCHROEDER, R. G.: «Operations Management», McGraw-Hill, 1993.

SERIEYX, H.: «El Desprecio Cero», McGraw-Hill, 1993.

WALTON, M.: «El Método Deming en la Práctica», Parramón, 1992.

WEGNED, L. F.: «El Milagro Japonés», ESIC, Editorial, 1988.

YU CHUEN TAO, L.: «El Control de Calidad en la Empresa», Deusto, 1969.

PARTE TERCERA

LA GESTION DE STOCKS DE PRODUCTOS TERMINADOS

CAPITULO 13

GESTION DE STOCKS CON DEMANDA INDEPENDIENTE. SISTEMAS MULTIPERIODICOS

13.1. INTRODUCCION

En el capítulo dedicado a los sistemas MRP indicábamos que las denominadas *técnicas clásicas* de gestión de stocks, objeto principal de este capítulo, eran adecuadas cuando la *demanda* a satisfacer era *independiente*; en cambio, su uso en el contexto de demanda dependiente no era aconsejable, pues, en dicho caso, no se cumplen las hipótesis básicas en que aquéllas se sustentan. El estudio del presente capítulo ayudará a comprender mejor dicha afirmación, así como el contenido del Apartado 4.1. En las *empresas de fabricación*, la demanda independiente se presenta, fundamentalmente, en los productos terminados, componentes vendidos directamente a los clientes para repuestos y reparación, piezas de repuesto y suministros industriales (lubricantes, disolventes, etc.) para el mantenimiento de los equipos, etc. En las *empresas de servicios*, prácticamente casi toda la demanda se considera independiente, especialmente en el sector de distribución (mayoristas y minoristas). En ambos sectores, pues, las técnicas clásicas encuentran un campo de aplicación.

Lo expuesto anteriormente no debe tomarse al pie de la letra, pues pueden existir excepciones. Así, puede ocurrir que existan componentes de fabricación cuya demanda dependiente proceda de un gran número de artículos. En ese caso, aunque la programación sea conocida, el número de cálculos a realizar puede ser excesivo y no estar justificado; además, dada la múltiple procedencia de la demanda, ésta podría resultar, en conjunto, prácticamente continua, por lo que podrían aplicársele los métodos de gestión objeto del presente capítulo. En el otro extremo *podemos encontrarnos con productos terminados cuya demanda pueda ser considerada dependiente;* ese es el caso de empresas con una *red de distribución de múltiples niveles*, a través de los cuales aquéllos van pasando antes de llegar al consumidor final, que lo adquiriría en el último nivel. Este sería el único en el que la demanda sería propiamente independiente, mientras que la de los restantes dependería de esta última. En estas circunstancias, serían aplicables técnicas análogas a MRP; concretamente en el Epígrafe 13.6 estudiaremos este caso a través de la **Planificación de los Recursos de Distribución** (*Distribution Resource Planning, DRP*).

13.2. SISTEMAS DE GESTION DE STOCKS

Como se indicaba en el Capítulo 1, las dos preguntas básicas a responder en la mayor parte de los problemas de inventarios son dos:

a) *¿Cuál debe ser el tamaño del lote a emitir?*
b) *¿Cuáles deben ser los momentos (frecuencia) de emisión?*

La interrelación entre dichas cuestiones es tan estrecha que la respuesta a una de ellas suele fijar la otra. Como veremos más adelante, los sistemas empleados en la práctica se centran en una y determinan la otra de forma residual. En cualquiera de los dos casos, la resolución se basa en la determinación de los costes que intervienen en el problema, los cuales deberán expresarse en función de la variable a determinar; hecho esto, se procederá a obtener el valor de esta última que minimiza la expresión obtenida para los costes totales. El modelo del caso real que se elabore variará con el conocimiento de la demanda y con la pregunta que deseemos contestar en primer lugar. Si la demanda es conocida exactamente, los costes serán más fácilmente calculables para cada acción, con lo que podremos llegar sin dificultad a unos resultados que minimicen el coste total. Si, por el contrario, lo que se conoce es la distribución de la demanda, se determinarán los costes esperados para cada posible decisión y se escogerá aquella que minimice el coste total esperado. Si el problema es de incertidumbre total, no existe procedimiento aceptado, pero siempre será posible realizar aproximaciones razonables. Lo dicho anteriormente supone que la intención de nuestro análisis será encontrar la dirección óptima de actuación. Sin embargo, en la práctica, nos encontraremos con gran número de casos excesivamente complejos o con insuficiente información; no por ello debemos dejar de intentar elaborar un modelo de gestión de stocks, ya que siempre será mejor uno aproximado que no utilizar ninguno.
Además de las anteriormente mencionadas existe otra cuestión a resolver a la hora de definir el sistema de gestión a adoptar:

c) *¿Con qué frecuencia debe comprobarse el nivel de inventarios existente?*

Las dos primeras preguntas serán tratadas en apartados posteriores. En el presente apartado abordaremos esta última y podremos comprobar cómo también está interrelacionada con las anteriores, de forma que no es posible responderlas de forma aislada sin correr el riesgo de llegar a resultados contradictorios.

13.2.1. Sistemas de revisión continua, SRC[1]

En este sistema, de forma continua o después de cada *transacción* (es decir, de cada llegada de stocks a almacenar o de demanda a satisfacer) se computa el **nivel de inventarios, NI**. Al hacerlo, no debe caerse en el error de considerar a este último como las existencias físicamente presentes en el momento de control, **E**, pues a éstas habrá que sumar las cantidades ya solicitadas y pendientes de recibir, que habíamos denominado **recepciones programadas** (ver Capítulo 4), **RP**, y que deducir los **pedidos pendientes** (solicitados pero aún no servidos), **PP**[2]. Es decir:

[1] Este apartado ha sido realizado en colaboración con María del Mar González Zamora.
[2] Coincidimos en esto con otros autores, tales como McLain (1992, pág. 213) o Schroeder (1993, pág. 593).

$NI = E + RP - PP$. Después de observar el nivel de inventarios, éste se compara con una cantidad, previamente establecida, denominada **Punto de Pedido**, P_p, cuya definición y cálculo se abordarán en el Apartado 13.3.1.1. Cuando $NI \leqslant P_p$, se emite un pedido igual a una cantidad constante, también determinada con anterioridad, que llegará al transcurrir el tiempo de suministro, *TS*. Este sistema implica utilizar un **modelo de cantidad fija de pedido** (ver Apartado 13.3.1), **CFP**, el cual da prioridad a la respuesta de la pregunta *a*), persiguiendo determinar el tamaño del **lote óptimo**, Q^*, que minimiza los costes de la gestión de stocks. La Figura 13.1[3] ilustra el procedimiento expuesto; la forma de cálculo de Q^* y P_p se verá en el Apartado 13.3.1. La evolución temporal del nivel de inventario dependerá del caso concreto, pudiendo verse algunos en el apartado mencionado.

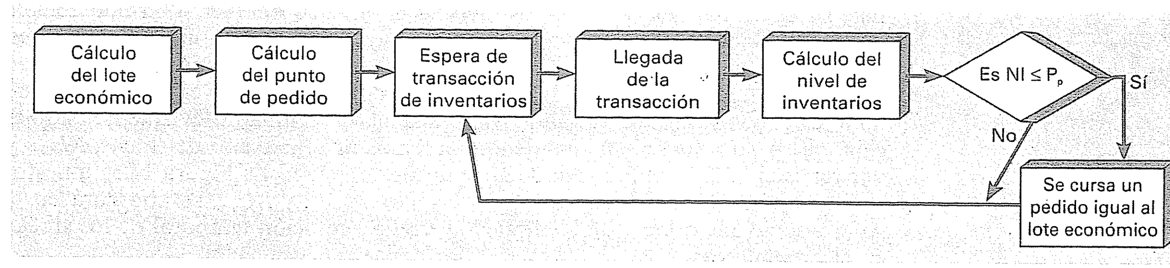


Figura 13.1. Sistema de revisión continua (SRC).

Este sistema de revisión puede implementarse con métodos informatizados, como, por ejemplo, el empleo de **códigos de barras**, que permiten una gran exactitud en la consideración de las transacciones y, con ello, una actualización fácil y continua del nivel de inventarios; cuando éste alcanza el punto de pedido, el ordenador realiza la emisión correspondiente, bien por impresora, bien mediante un sistema EDI (ver Apartado 4.7.11). Sin embargo, artículos que poseen un escaso valor y que están sometidos a un alto grado de utilización (por ejemplo: grapas, tuercas, etc.), para los cuales los beneficios derivados de un sistema más evolucionado no compensan los costes que éste conlleva, pueden emplearse métodos manuales menos sofisticados. Un conocido **sistema** es el denominado **de los dos contenedores**. Este (ver Figura 13.2) se basa en la existencia de dos áreas separadas de almacenamiento, C1 y C2, que pueden ser o no contenedores propiamente dichos, cada uno de los cuales almacena cierta cantidad de materia-

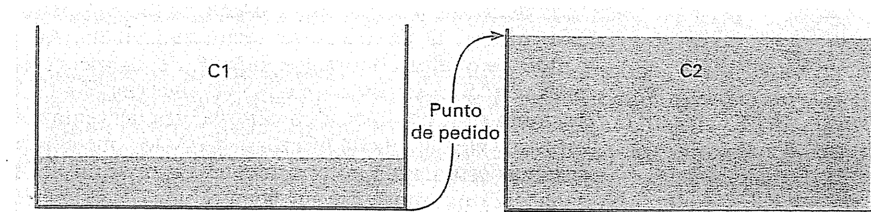


Figura 13.2. Sistema de los dos contenedores.

[3] Adaptada de J. A. D. Machuca (1978, pág. 17).

les. Cuando la empresa necesite hacer uso de éstos, se irá abasteciendo de uno de ellos (en nuestro ejemplo el C1), pasando sólo al siguiente (C2) cuando el anterior se haya agotado. Llegado este momento, se considerará alcanzado el punto de pedido, que coincide con el contenido de C2, procediéndose a la emisión del mismo; una vez recibido, éste servirá, por una parte, para reponer el C2 en la cantidad que haya sido utilizada durante el tiempo de suministro del pedido anterior, empleándose el resto para llenar C1, del que la firma empezará a abastecerse de nuevo en caso necesario, dando lugar nuevamente al proceso descrito.

13.2.2. Sistemas de revisión periódica, SRP

Este sistema está asociado con los **modelos de período fijo** (ver Apartado 13.3.2), **PF**, que responden, en primer lugar, a la pregunta *b*), determinando el **tiempo óptimo entre pedidos,** T^*, que minimiza los costes totales de gestión. Cada vez que transcurre dicho tiempo se mide el nivel de inventarios, *NI*, y se emite el pedido de un lote, *Q*, que se calcula restando *NI* de una cierta cantidad previamente establecida (ver Apartado 13.3.2), que denominaremos nivel máximo de stocks, $NI_{máx}$, y que representa el nivel objetivo de inventarios a reponer. La Figura 13.3[4] muestra el proceso mencionado; en cuanto al cálculo de T^* y $NI_{máx}$, se abordará en el Apartado 13.3.2, donde también puede verse la evolución temporal de los stocks en el presente caso.

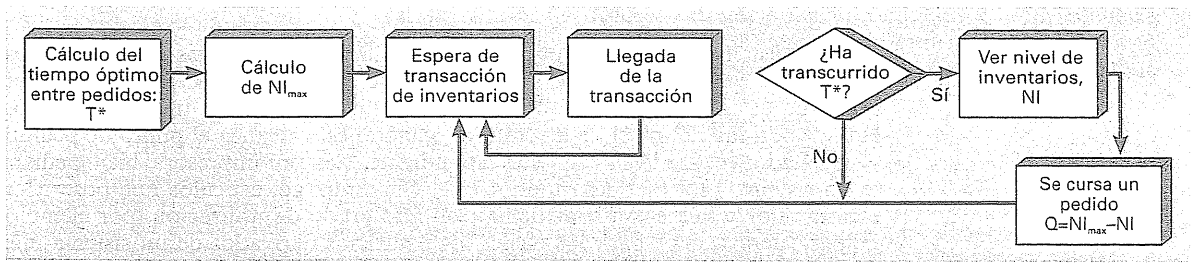


Figura 13.3. Sistema de revisión periódica (SRP).

13.2.3. Sistema mixto o de mínimo-máximo, SMM

Uno de los problemas que presenta el sistema de revisión periódica es que, en el caso de que la demanda sea demasiado lenta, los pedidos emitidos serán muy pequeños y antieconómicos; además, con frecuencia serán incluso innecesarios, pues, en el caso mencionado, el nivel medio de stock mantenido puede ser bastante elevado, lo cual constituye otra desventaja del SRP. Para paliar en parte estos problemas puede utilizarse el SMM, que combina características de los dos sistemas estudiados anteriormente. La revisión del nivel de inventario se realiza cada vez que transcurre un tiempo fijo, T^*, al igual que en el sistema de revisión periódica, pero sólo se emite un lote si, en dicho instante, *NI* es igual o inferior a

[4] Adaptada de J. A. D. Machuca (1978, pág. 19).

un determinado **nivel mínimo de stocks,** $NI_{mín}$, juzgado suficiente para hacer frente a la demanda del siguiente período; este último juega un papel parecido al del punto de pedido del sistema de revisión continua. Cuando se emite un lote, éste se mide, como en el SRP, en relación con un **nivel máximo de inventario** a reponer $NI_{máx}$, de forma que $Q = NI_{máx} - NI$. Las Figuras 13.4*a*[5] y 13.4*b* muestran, respectivamente, el procedimiento mencionado y una posible evolución temporal de unos stocks gestionados con este sistema (con hipótesis de TS = O).

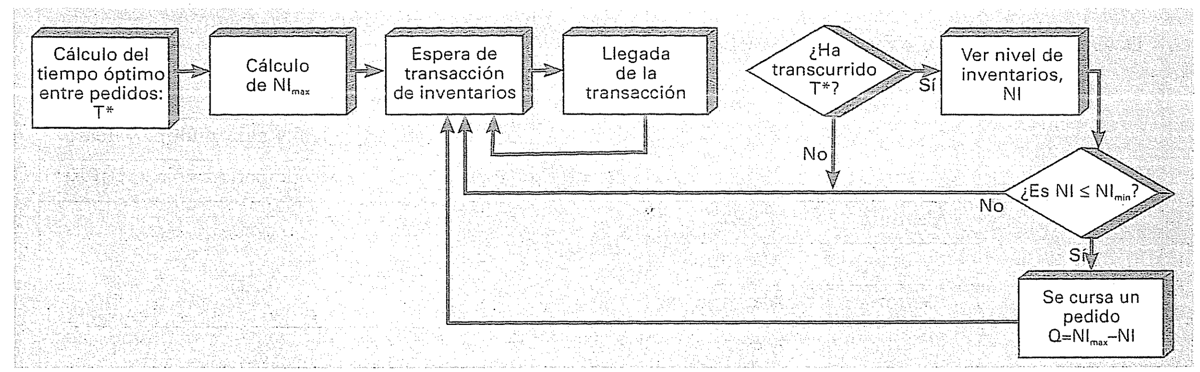


Figura 13.4*a*. Sistema mixto (SMM).

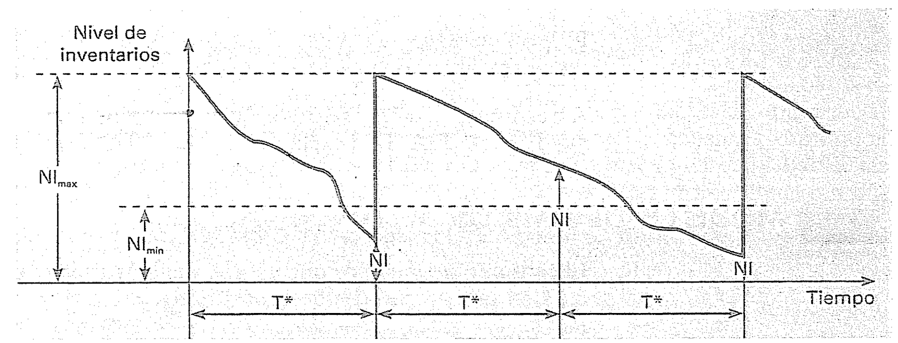


Figura 13.4*b*. Evolución de los inventarios con el SMM.

13.2.4. Clasificación de los modelos de inventarios multiperiódicos

Como hemos podido observar en los apartados anteriores, los sistemas mencionados se caracterizan por desarrollarse a lo largo de múltiples períodos, dando lugar a un conjunto de decisiones repetitivas en cada uno de ellos. El Cuadro 13.1 resume los modelos concretos que abordaremos en los próximos apartados, clasificados en función del tipo de demanda y del tiempo de suministro (ciertos y aleatorios), así como del sistema elegido. Dada la similitud existente en los

[5] Adaptada de J. A. D. Machuca (1978, pág. 19).

Cuadro 13.1 Algunos modelos de gestión de inventarios

Modelos	Demanda	Tiempo de suministro	Sistema	Casos
Determinístico	Cierta	Cierto	Cantidad fija de pedido (CFP)	Modelo básico de cantidad fija de pedido (MBCFP)
				MBCFP con simultaneidad en el consumo y el reaprovisionamiento del inventario
				MBCFP con posibilidad de descuento en el coste de obtención
				Gestión de stocks para múltiples items
			Período fijo (PF)	Modelo básico de período fijo (MBPF)
Probabilístico	Aleatoria	Cierto	Cantidad fija de pedido (CFP)	∘ Modelos básicos
	Cierta	Aleatorio		
	Aleatoria	Aleatorio		
	Cierta	Aleatorio	Período fijo (PF)	∘ Modelos básicos
	Aleatoria	Cierto		

procedimientos empleados en los modelos de cantidad fija de pedido y de período fijo, nos ocuparemos básicamente del primero de ellos y trataremos de forma más somera el segundo, centrándonos especialmente en sus aspectos diferenciadores. Ambos casos serán ilustrados con ejemplos (para un mayor número de éstos puede verse J. A. D. Machuca y otros (1990, Capítulos 19 y 20)).

13.3. MODELOS DINAMICOS DETERMINISTICOS

El conjunto de modelos que vamos a englobar en el presente apartado se desarrollará en un entorno donde las distintas *variables* que intervienen serán supuestamente *constantes y conocidas con certeza*. Además se darán otras hipótesis adicionales, comunes a todos ellos: la *demanda* diaria que sufran será *continua y uniforme*; *el coste de emisión* será considerado independientemente del tamaño del pedido; el ***coste de posesión*** será proporcional a la cantidad almacenada y al tiempo que ésta permanezca como inventario. Como se indicó en el Cuadro 13.1, abordaremos dos grandes grupos de modelos, los de **cantidad fija de pedido,** en los que la base es el cálculo del lote óptimo a emitir, y los de **período fijo,** en los que la base es el cálculo del tiempo óptimo entre pedidos. Pasamos a continuación a estudiar ambos casos.

13.3.1. Modelos de cantidad fija de pedido

Sin ser exhaustivos, en este apartado vamos a desarrollar una familia de modelos que tienen las siguientes características comunes:

- Siempre se pedirá una misma cantidad, Q^*, conocida como **lote económico**[6].
- La emisión del pedido se realizará cuando el almacén alcance un determinado nivel de inventarios, conocido como **punto de pedido,** P_p.

13.3.1.1. *Modelo básico de cantidad fija de pedido*

Este modelo fue desarrollado por Harris (1915), siendo un consultor llamado Wilson quien extendió enormemente su uso; tanto es así que la expresión que representa el cálculo del lote óptimo o lote económico, Q^*, es conocida hoy como *fórmula de Wilson*, la cual desarrollaremos en el presente apartado. En el caso que aquí contemplamos, la emisión del pedido se realiza de tal forma que el lote llegará completo, de una sola vez, en el instante en que se hace cero el nivel de inventarios del almacén, por lo que no se permitirán rupturas de stocks. Estas condiciones, junto con las enunciadas más arriba, harán que dicho nivel varíe con el tiempo de la forma que se indica en la Figura 13.5.

El **lote óptimo** a emitir, Q^*, será aquel que minimice los costes generados en la gestión de inventarios, de los cuales se consideran aquí los de emisión, posesión y adquisición, ya que, como se ha dicho anteriormente, no se permitirá la ruptura. El **coste total de emisión,** Γ_e, es igual al coste unitario del mismo, c_e, multiplicado por el número de pedidos que se vaya a realizar durante el **horizonte de planificación,** θ. Dado que cada vez se pedirá la misma cantidad, Q, el número de pedidos necesarios para satisfacer la demanda total, D, denominado **frecuencia de pedido,** f, será igual a D/Q. Así pues, será $\Gamma_e = c_e f = c_e D/Q$, resultando inversamente proporcional al tamaño del lote a emitir (ver Figura 13.6*a*). El coste total de posesión, Γ_p (Figura 13.6*b*), se calculará como el producto del coste unitario de posesión, c_p, por el stock medio, $Q/2$, que ha existido durante todo el horizonte temporal, θ (ver Cuadro 13.2), por lo que se puede expresar como $\Gamma_p = c_p \theta Q/2$. De ello se deduce que es proporcional al tamaño del lote (ver Figura 13.6*b*). Por último, el **coste total de adquisición,** Γ_a, será el producto del coste unitario de adquisición, c_a, por el número de unidades, D, que se va a consumir durante el horizonte temporal, θ. Por tanto, este coste será $\Gamma_a = c_a D$, el cual, dadas las hipótesis asumidas, es independiente del tamaño del lote. Su representación gráfica sería, pues, una línea horizontal en unos ejes costes/Q.

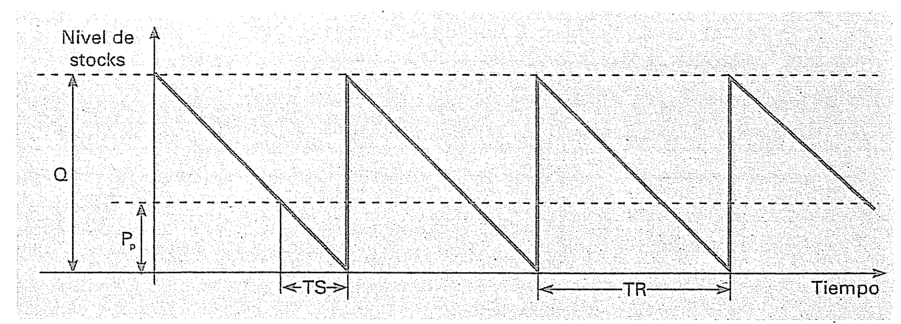


Figura 13.5. Modelo básico de cantidad fija de pedido.

[6] En Larrañeta-Onieva (1988, págs. 341-354) se estudian las razones del uso de una cantidad fija de pedido.

Cuadro 13.2 Determinación del coste total de posesión

Para determinar este coste total nos basaremos en la Figura 13.5 y nos centraremos en un único período, TR, y después generalizar a todo el horizonte de gestión, θ. Por tanto, al ser la demanda continua, uniforme y constante, en cada unidad de tiempo saldrán del almacén D/θ unidades (demanda diaria). El coste de posesión para el período TR será la suma de los costes generados en cada *unidad de tiempo* (ut) durante dicho período, es decir, para la primera ut será c_pQ, para la segunda $c_p(Q\text{-}D/\theta)$, para la tercera $c_p(Q\text{-}2D/\theta)$, y así sucesivamente, hasta el instante TR, en que será cero por anularse los inventarios. Así pues, haciendo la suma de todos ellos se tendrá que $\Gamma_{pTR} = c_pQ + c_p(Q\text{-}D/\theta) + c_p(Q\text{-}2D/\theta) + c_p(Q\text{-}3D/\theta) + \cdots + c_p[Q\text{-}(TR\text{-}1)D/\theta] = c_pQ + c_pQ\text{-}c_pD/\theta + c_pQ\text{-}c_p2D/\theta + c_pQ\text{-}c_p3D/\theta + \cdots + c_pQ\text{-}c_p(TR\text{-}1)D/\theta = c_pQ * TR - c_pD/\theta[1 + 2 + 3 + \cdots + (TR\text{-}1)] = c_p\{TR * Q\text{-}(D/\theta)[1 + 2 + 3 + \cdots + (TR\text{-}1)]\}$ = (al ser el último paréntesis una progresión aritmética de razón 1) $= c_p\{TR * Q\text{-}(D/\theta)[TR(1 + (TR\text{-}1))/2]\} = c_pTR(Q\text{-}TR * D/2\,\theta) = c_pTR(Q\text{-}Q/2) = c_pTR * Q/2$. Si multiplicamos esta expresión por el número de períodos que contiene el horizonte θ, θ/TR, o frecuencia de pedidos en función del tiempo y no de las unidades físicas como se vio anteriormente, quedará $\Gamma_p = (c_pTR * Q/2)\theta/TR = c_p\theta Q/2$.

El coste total a considerar en la gestión vendrá dado por la suma de los tres componentes anteriormente mencionados, $\Gamma_T = \Gamma_e + \Gamma_p + \Gamma_a$, debiendo minimizar dicha expresión para encontrar el valor del lote económico Q^*. Dado que, para ello, habría que derivarla en función de Q y que el tercer sumando no depende de esta variable, los únicos costes relevantes para dicho cálculo serán Γ_e y Γ_p, cuya suma, $\Gamma_{TV} = \Gamma_e + \Gamma_p = c_eD/Q + c_p\theta Q/2$, será la que hay que minimizar (ver Figura 13.6*c*). Derivando e igualando a cero para obtener las condiciones de mínimo[7], se tendrá: $-c_eD/(Q^*)^2 + c_p\theta/2 = 0$[8], de donde se obtiene, despejando Q^*, la fórmula del lote óptimo:

$$Q^* = \sqrt{2c_eD/c_p\theta}$$

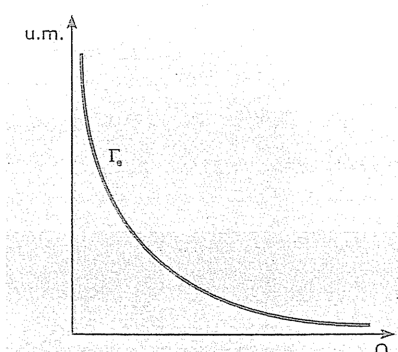


Figura 13.6*a*. Coste total de emisión.

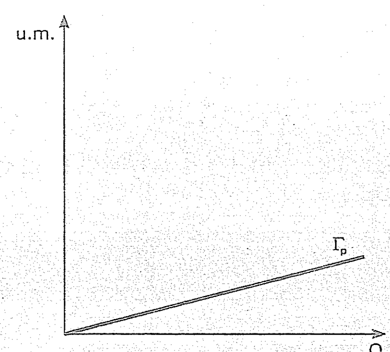


Figura 13.6*b*. Coste total de posesión.

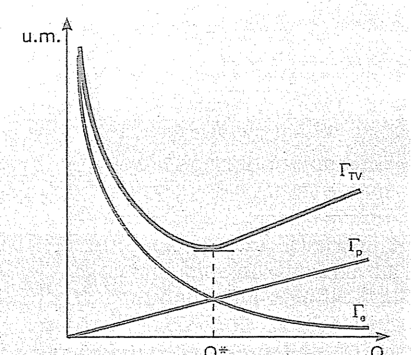


Figura 13.6*c*. Cálculo del lote económico.

[7] También se puede obtener el mismo resultado igualando los costes de posesión y emisión, pero hemos optado por el método propuesto, ya que el criterio del mínimo, a través de las derivadas de las funciones, se puede utilizar en todos los casos.

[8] Al haber igualado a cero ya estamos en el coste mínimo, por lo que el correspondiente Q será el lote económico, de ahí que se haya representado por Q^*.

Si se sustituye el valor de Q^* en la fórmula de Γ_{TV} se tendrá que:

$$\Gamma_{TV}^* = c_p\theta Q^*/2 + c_eD/Q^* = c_p\theta\sqrt{2c_eD/c_p\theta}\Big/2 + c_eD\Big/\sqrt{2c_eD/c_p\theta} =$$
$$= \sqrt{2c_eD\ c_p\theta} \quad \text{y} \quad \Gamma_T^* = c_aD + \sqrt{2c_eDc_p\theta}.$$

Si ahora dividimos la fórmula general del Γ_{TV} por la obtenida para Γ_{TV}^*, y se opera con la expresión resultante, se llegará a la conclusión de que $\Gamma_{TV}/\Gamma_{TV}^* = [(Q/Q^*) + (Q^*/Q)]/2$, que medirá la *sensibilidad del* Γ_{TV} *frente a cambios en el tamaño del lote* Q. Por ejemplo, si se hace $Q = Q^*/2$, dicha expresión tomará el valor de 1,25; esto quiere decir que, para variaciones del lote de pedido real comprendidas entre $Q^*/2$ y $2Q^*$, Γ_{TV} se incrementará en un 25 por 100, de lo que se puede deducir que dicho coste es poco sensible a pequeñas variaciones del tamaño del lote alrededor del valor óptimo.

Resuelta la cuestión de la cantidad óptima a emitir, queda saber cuándo deberán realizarse las distintas emisiones. Ello se resuelve solicitando un pedido cuando las existencias en almacén alcancen el nivel correspondiente al denominado **Punto de Pedido,** P_p. Dicho concepto suele definirse, frecuentemente, como el nivel de inventario necesario para soportar la demanda durante el **tiempo de suministro,** TS, cuando, en realidad, debería definirse en función de la demanda a cubrir hasta que llegue el próximo lote, lo cual no es lo mismo. Para que sea correcta la primera definición, es necesario que TS sea inferior al tiempo que existe entre la recepción de dos pedidos consecutivos (**tiempo de reaprovisionamiento,** TR), como sucede en el caso expuesto en la Figura 13.5; en ese caso su cálculo sería el producto de TS por la demanda diaria. En caso contrario, $TS > TR$, si realizamos dicho cálculo mediante la formulación mencionada, el nivel de existencias resultante, $TS * D/\theta$, sería superior al nivel máximo de stocks que puede producirse en realidad, que es igual a $Q = TR * D/\theta$ (ver Figura 13.7), por lo que, dada su función, no se realizaría nunca un pedido. Para estos casos, es muy conveniente ver cuántos períodos de reaprovisionamiento están incluidos dentro del tiempo de suministro, para lo cual se haría el cociente TS/TR. Si denominamos $E[TS/TR]$ a la parte entera de dicho cociente, el intervalo de tiempo que hay que emplear en la formulación será igual a $TS\text{-}E[TS/TR]TR$, por lo que la expresión más general del **punto de pedido** en el tipo de modelo planteado será (ver Ejemplo 13.1):

$$P_p = (TS\text{-}E[TS/TR]TR)\ D/\theta = TS_p\ D/\theta$$ [9]

EJEMPLO 13.1. Determinación del lote óptimo y punto de pedido en un modelo básico de cantidad fija de pedido

Hallar el valor del lote óptimo y punto de pedido para un modelo de cantidad fija de pedido, utilizando los siguientes datos:

Demanda anual (D):	1000 unidades
Coste de emisión (c_e):	5 u.m./pedido
Coste unitario de posesión (c_p)	1 u.m./año
Tiempo de suministro (TS):	15 días

El **lote óptimo** se calcularía utilizando la expresión $Q^* = \sqrt{2c_eD/c_p\theta}$, donde θ, que se expresa en las mismas unidades de tiempo que se utilizan en c_p, será un año. Sustituyendo, pues, $Q^* = \sqrt{2 * 5 * 1000/1 * 1} = 100$ unidades.

Con el lote calculado anteriormente se puede conocer la frecuencia de pedidos, f, ya que ésta se puede calcular como D/Q^* (ver apartado anterior); en este caso

[9] Para simplificar hemos llamado TS_p a la expresión $(TS\text{-}E(TS/TR)TR)$. A partir de ahora utilizaremos dicho símbolo en la formulación.

1000/100 = 10. A partir de ésta, podemos obtener el **período óptimo de reaprovisionamiento**, ya que si se hacen 10 pedidos al año, y suponemos, por facilitar los cálculos, que éste tiene 250 días laborables (50 semanas a 5 días laborables cada una), habrá que hacer un pedido cada 25 días ($TR^* = \theta/f = 250/10 = 25$). Como $TS < TR^*$, el **punto de pedido** será $P_p = TS * D/\theta = 15 * 1000/250 =$ = 60 unidades.

En el caso de que TS hubiese sido mayor que TR^*, por ejemplo 40 días, no se hubiese podido aplicar la fórmula anterior, ya que, como puede apreciarse en la Figura 13.7, se habría obtenido un punto de pedido de 40 * 1000/250 = 160 unidades, nivel de inventarios que no se tiene jamás, ya que su máximo es precisamente Q^*, que era de 100 unidades; luego sería necesario aplicar la expresión expuesta en el desarrollo del modelo $P_p = (TS\text{-}E[TS/TR]TR)D/\theta = TS_pD/\theta \Rightarrow P_p = (40\text{-}E[40/25] * 25) * 1000/250 = (40\text{-}E[1,6] * 25) * 1000/250) = (40\text{-}1 * 25) * 1000/250 = 15 * 1000/250 =$ = 60 unidades.

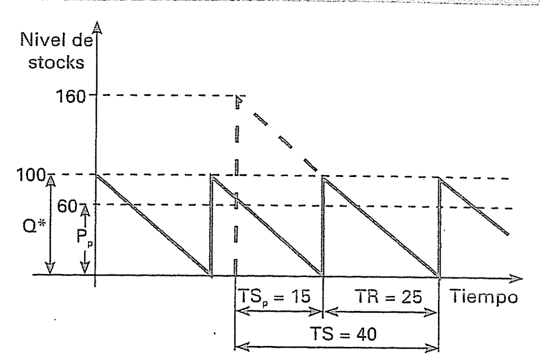


Figura 13.7. Modelo básico CFP con TS > TR.

13.3.1.2. *Modelo básico de cantidad fija de pedido con simultaneidad en el consumo y el reaprovisionamiento del inventario*

La diferencia de este modelo con respecto al anterior es que el lote no llega de una vez completo, sino que lo hace por partes a un ritmo constante, **p**, que se suele denominar **tasa de fabricación** (si se produce internamente) o **de entrega** (en caso contrario). Como es lógico, esta tasa debería ser superior a la **demanda diaria**, D/θ, que, a partir de ahora, por comodidad en los desarrollos, denominaremos **d**. Con estas condiciones, el nivel de inventarios irá creciendo durante todo el **período de fabricación o entrega** (t) del lote solicitado a razón de $p\text{-}d$ items en cada unidad de tiempo (ver Figura 13.8).

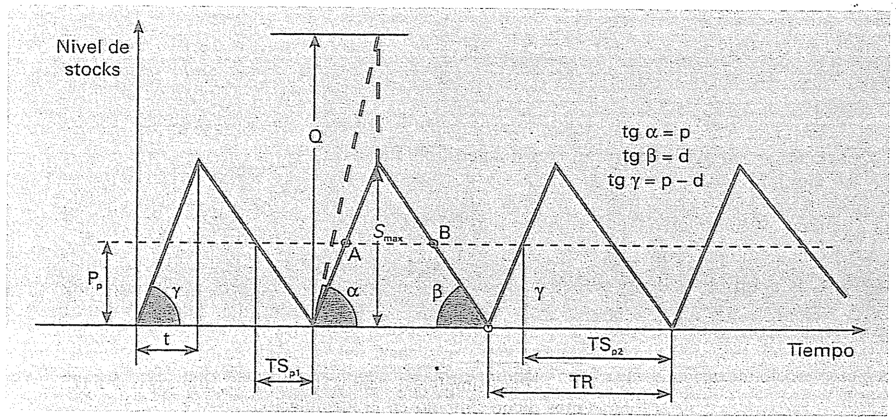


Figura 13.8. Modelo de consumo y reaprovisionamiento simultáneo.

Dadas las características mencionadas, el stock máximo que se alcanzará, $S_{máx}$, será inferior al Q solicitado, ya que, durante las t unidades de tiempo en que se ha estado recibiendo Q, parte del mismo se habrá estado consumiendo de forma simultánea. Analíticamente es fácil comprobarlo, ya que $Q = p * t$ y, como se puede deducir de la Figura 13.8, el $S_{máx} = (p\text{-}d) * t$, de donde $S_{máx} = Q - d * t$.

Veamos cuál será en este caso el lote óptimo a pedir. Con respecto al modelo anterior, tan sólo se diferencia en el coste de posesión, ya que el stock medio será, en este caso, $S_{máx}/2 = (p\text{-}d)t/2 = (p\text{-}d)(Q/p)/2$, por lo que $\Gamma_p = c_p \cdot S_{máx}/2 = c_p\theta(p\text{-}d)Q/2p$. De esta forma, siguiendo el mismo razonamiento que en el apartado anterior, se deriva que el tamaño del lote óptimo para estas condiciones, será:

$$Q^* = \sqrt{(2c_e\ D/c_p\theta)\,[p/(p\text{-}d)]}$$

Al utilizar este modelo hay que vigilar con suma atención el cálculo del punto de pedido, pues en cada TR se alcanza dos veces dicho valor, una en el tramo de subida y otra en el de disminución del inventario (ver, respectivamente, puntos A y B en Figura 13.8). En el primer caso ($TS_p < TR\text{-}t$), tendremos que utilizar la expresión $P_p = TS_{p1} * d$ (ver TS_{p1} en la Figura 13.8), mientras que en el segundo ($TS_p > TR\text{-}t$), tendremos que $P_p = (TR\text{-}TS_{p2})\ (p\text{-}d)$ (ver TS_{p2} en la Figura 13.8). Una ilustración de este caso se puede ver en el Ejemplo 13.2.

EJEMPLO 13.2. Determinación del lote óptimo y punto de pedido en un modelo de consumo y reaprovisionamiento simultáneo

Una empresa fabrica un determinado producto, cuyo ensamblaje final se hace en una línea de montaje que trabaja diariamente. Uno de los componentes de este ítem se produce en otro departamento de la empresa, a un ritmo de 100 unidades diarias ($p = 100$), mientras que la línea de montaje lo utiliza a razón de 40 unidades/día. Si el coste unitario de emisión de un pedido (c_e) es de 50 u.m. y el unitario de posesión (c_p) es de 0,5 u.m/año, se desea conocer el punto de pedido y el lote óptimo a solicitar sabiendo que el tiempo de suministro es de 35 días. El horizonte a considerar para la gestión es $\theta = 10$ meses de 25 días laborables/mes.

De acuerdo con ello, $D = d * \theta * 25 = 40 * 10 * 25 =$ = 10.000 y, aplicando la fórmula del lote óptimo tendremos: $Q^* = \sqrt{(2c_e\ D/c_p\theta) * [p/(p\text{-}d)]} =$ $= \sqrt{(2 * 50 * 10.000/[0,5 * (10/12)]) * [100/(100\text{-}40)]} =$ = 2000 unidades.

Para calcular el P_p tendremos que estudiar cuál es la relación existente entre el tiempo de suministro, el tiempo de reaprovisionamiento y el tiempo de fabricación. El tiempo de reaprovisionamiento será $TR = \theta/f = \theta/(D/Q^*) = 250$ días/(10.000/2000) = 50 días. Por otra parte, el tiempo de fabricación del lote será $t = Q^*/p = 2000/100 = 20$ días. Luego nos encontramos con el caso en que $(TR\text{-}t) < TS < TR$, por lo que el pedido habrá que realizarlo en la zona de producción y consumo simultáneo, es decir, mientras que el almacén va incrementando su nivel de existencias a razón de $p\text{-}d$ unidades diarias. Así pues, $P_p = (TR\text{-}TS)(p\text{-}d) = (50\text{-}35) \times (100\text{-}40) = 15 * 60 = 900$.

13.3.1.3. *Modelo de cantidad fija de pedido con posibilidad de descuentos en el coste de obtención*

Puede darse el caso de que los costes de obtención de un determinado ítem desciendan cuando la cantidad solicitada sobrepase un cierto valor (por ejemplo: descuentos de un proveedor, disminución en los costes unitarios de fabricación, etcétera), en cuyo caso habría que tener en cuenta esta diferencia a la hora de

determinar el tamaño de Q^*. Para ello se supondrá que el coste unitario de adquisición, c_a, será c_{a1} para lotes inferiores a una determinada cantidad, «a», y c_{a2} para los que sean iguales o superiores a dicho tamaño, siendo $c_{a2} < c_{a1}$; el coste de posesión se supondrá proporcional al coste de obtención, es decir, $c_p = \alpha c_a$, siendo α el factor de proporcionalidad. De acuerdo con ello, las expresiones del lote económico, Q_i^*, y de los costes totales generados dependerán del valor de c_a, dando lugar a:

$$Q_i^* = \sqrt{2c_e D/\alpha c_{ai}\theta}$$

Para $0 < Q < a$: $\Gamma_{T1} = c_{a1}D + c_e D/Q + \alpha c_{a1}\theta/2$.

Para $a \leqslant Q \leqslant \infty$: $\Gamma_{T2} = c_{a2}D + c_e D/Q + \alpha c_{a2}\theta/2$.

Considerando dichas expresiones independientes y representándolas gráficamente para cada uno de los costes de adquisición, se obtiene la Figura 13.9, donde se puede apreciar cuál sería el lote óptimo para cada uno de los casos.

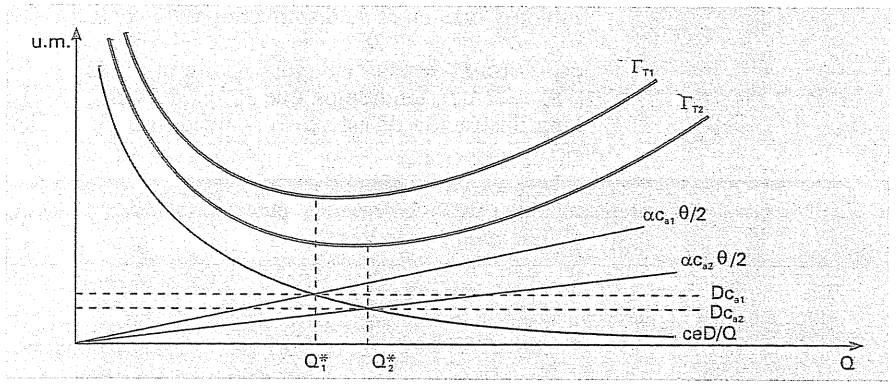


Figura 13.9. Costes totales para costes de adquisición diferentes.

Ahora bien, en realidad no se trata de dos casos independientes, sino de uno solo, del que consideraremos ahora las posibles situaciones que se pueden dar, dependiendo del tamaño de «a» con respecto a los lotes económicos Q_1^* y Q_2^*. La curva a tener en cuenta será una combinación de las dos anteriores, de forma que a la izquierda de «a» (con coste c_{a1}) se utilizará la curva Γ_{T1} y a la derecha (con coste c_{a2}), deberá tomarse la Γ_{T2}. Ello da lugar a un salto en la curva de costes, cuyo punto de discontinuidad está situado justamente en el valor, ya referido, de $Q = a$. Dichos casos serían:

- $a < Q_1^* < Q_2^*$. Representado en la Figura 13.10a. Se puede apreciar que el lote económico, Q^*, coincide con el Q_2^*.
- $Q_1^* < a < Q_2^*$. (Ver Figura 13.10b.) También aquí, como en el caso anterior, el lote económico Q^*, coincide con Q_2^*.
- $Q_1^* < Q_2^* < a$. A partir del momento en que «a» supera a Q_2^*, el mínimo de la curva de costes totales no podrá ser ya Q_2^*, pues este punto no pertenece a la curva conjunta de costes totales en la nueva situación. Como puede comprobarse en las Figuras 13.10c y 13.10d, pueden presentarse dos posibilidades diferentes para dicho mínimo: si la situación de «a» es tal que el valor del correspondiente coste en Γ_{T2} es inferior al que proporciona Q_1^* en

Γ_{T1}, el lote económico sería $Q^* = a$. Si, por el contrario, «a» se aleja tanto que su coste supera al de Q_1^*, el óptimo sería, lógicamente, $Q^* = Q_1^*$. El procedimiento analítico para calcular Q puede verse en el Ejemplo 13.3.

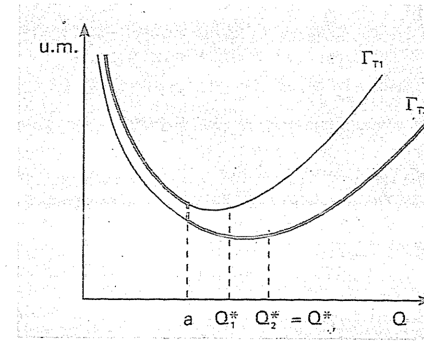


Figura 13.10a. Lote óptimo para $a < Q_1^* < Q_2^*$.

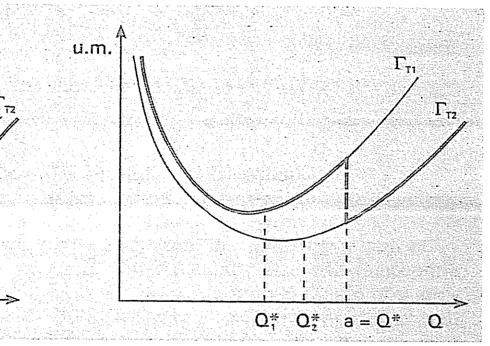


Figura 13.10b. Lote óptimo para $Q_1^* < a < Q_2^*$.

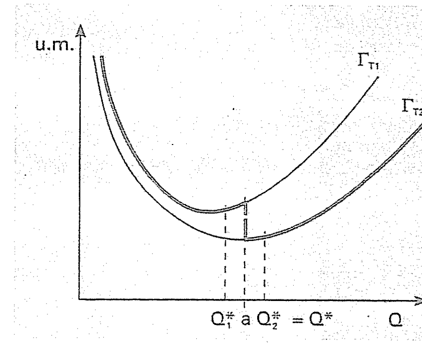


Figura 13.10c. Lote óptimo para $Q_1^* < Q_2^* < a$.

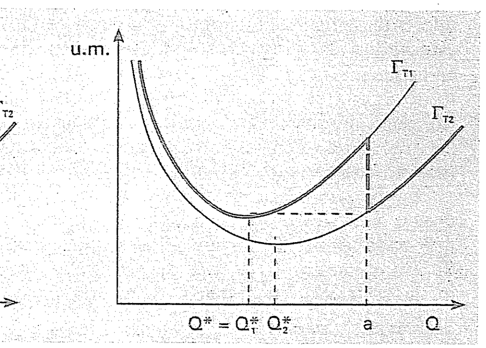


Figura 13.10d. Lote óptimo para $Q_1^* < Q_2^* <<< a$.

EJEMPLO 13.3. Determinación del lote óptimo en un modelo con descuentos y coste de posesión proporcional al coste de adquisición

Va a calcularse el lote económico de un producto cuyo coste de fabricación desciende de 1000 u.m. (c_{a1}) a 925 u.m. (c_{a2}) cuando el pedido supera o iguala las 1000 unidades (a). El coste de emisión del pedido es de 35.000 u.m. La demanda es de 2400 unidades al año y el coeficiente de proporcionalidad (α) entre el coste de posesión y el coste de adquisición es de $0,6 * 10^{-3}$. El horizonte de gestión será de un año (360 días).

Primeramente calcularemos los lotes económicos con los distintos costes de fabricación: ($Q_i^* = \sqrt{2\ C_e D/\alpha C a_i \theta}$):

$$Q_1^* = \sqrt{2 * 35\,000 * 2400/0{,}6 * 10^{-3} * 1000 * 360} \approx$$
$$\approx 882 \text{ unidades}$$

$$Q_2^* = \sqrt{2 * 35\,000 * 2400/0{,}6 * 10^{-3} * 925 * 360} \approx$$
$$\approx 917 \text{ unidades}$$

En el presente caso $Q_1^* < Q_2^* < a$, luego el lote óptimo a pedir puede ser «a» o Q_1^*. Para ello calcularemos los costes totales generados en ambos casos:

Para $Q = a$:

$\Gamma_T = c_{a2}D + c_e D/a + \alpha c_{a2}\theta a/2 = 925 * 2400 + 35.000 * 2400/1000 + 0,6 * 10^{-3} * 925 * 360 * 1000/2 = 2\,403\,900$ u.m.

Para $Q = Q_1^*$:

$\Gamma_T = c_{a1}D + c_e D/Q_1^* + \alpha c_{a1}\theta Q_1^*/2 = 1000 * 2400 + 35\,000 * 2400/882 + 0,6 * 10^{-3} * 1000 * 360 * 882/2 = 2\,590\,494$ u.m.

Ello indica que el lote económico debe ser $Q^* = a = 1000$ unidades.

Cuadro 13.3 Gestión de stocks para múltiples items con modelos básicos de CFP[10]

La mayor parte de los sistemas reales de inventarios almacenan diversos artículos y no solamente un único tipo, como se ha supuesto hasta ahora. Se podrá estudiar la gestión de stocks de cada artículo individualmente si no se presentan interacciones, es decir, si no se da competencia entre ellos en la utilización de uno o varios recursos que existan en cantidad limitada (por ejemplo: espacio de almacén, capital invertible en stocks, etc...); en caso contrario, el cálculo del lote económico para los diferentes artículos, tal como se ha hecho en los modelos estudiados, dará lugar a resultados inadmisibles ya que, en general, tendrán como consecuencia el incumplimiento de alguna de las restricciones existentes. Será necesario, pues, modificar las fórmulas establecidas con objeto de que se respeten las mencionadas restricciones. Veamos un caso.

Supongamos que se dispone de un espacio total, E, donde van a ser almacenados «n» items diferentes y que cada unidad del artículo «i» ocupará un espacio E_i. Si denominamos Q_i al lote de pedido de dicho artículo, la **restricción de espacio** se podría expresar como $K\sum_{i=1}^{n} E_iQ_i = K(E_1Q_1 + E_2Q_2 + \cdots + E_nQ_n) \leq E$, donde K es un elemento de normalización comprendido entre 0 y 1, cuya inclusión es debida al hecho de que los stocks de los diferentes artículos pueden ser reaprovisionados independientemente unos de otros; los valores de este parámetro comprendidos entre 0,5 y 1 son bastante aceptables en la práctica.

Si partimos del modelo básico, el **coste total** objeto de minimización, Γ_{TV}, que genera esta política vendrá dado por $\Gamma_{TV} = \sum_{i=1}^{n}(c_{ei}D_i/Q_i + c_{pi}\theta Q_i/2)$. A partir de la derivada de esta función con respecto a los distintos Q_i se obtendrán los distintos Q_i^*, si éstos cumplen la restricción expuesta anteriormente, no presentarán ningún tipo de problema. En ese caso se dice que la *restricción* es *inactiva*. En caso contrario, la *restricción* es *activa* y se podrá resolver el problema utilizando la técnica de los multiplicadores de Lagrange. Para ello, se expresa la restricción de la forma $E\text{-}K\sum_{i=1}^{n} E_iQ_i \geq 0$ y, llamando λ (=*multiplicador de Lagrange*) a una cantidad que sea menor que cero cuando la restricción anterior se cumpla con signo de igualdad y cero cuando ésta sea positiva, podremos escribir $\Gamma_{TV} = \sum_{i=1}^{n}(c_{ei}Di/Qi + c_{pi}\theta Qi/2) + \lambda(E\text{-}K\Sigma E_iQ_i)$, expresión con valor idéntico a la anterior, ya que, por las razones apuntadas, el segundo sumando siempre es nulo. Se conseguirá el mínimo absoluto de dicha función cuando sean iguales a cero las derivadas parciales de la misma con respecto a cada Q_i y a λ, obteniendo λ^* y los Q_i^*. El primero es un valor numérico y los segundos tienen la forma:

$$Q_i^* = \sqrt{2c_{ei}\, D_i/(c_{pi}\theta\text{-}2\lambda * KE_i)}$$

Puede observarse que en el caso de que la restricción sea inactiva, $\lambda = 0$, los lotes económicos coincidirán con los calculados en el modelo básico; en el caso contrario, λ, será menor que cero, por lo que se obtendrán lotes menores que los anteriores, de forma que se satisfaga la restricción. Si hubiera más de una restricción, el proceso sería el mismo que el indicado pero aparecerían tantas λ como restricciones existieran.

13.3.2. Modelo básico de período fijo

Como indicábamos al principio, en este modelo la cuestión fundamental es el **cuándo pedir**, consistiendo la gestión en lanzar un pedido cada vez que transcurre

[10] Para un ejemplo numérico de este caso véase J. A. D. Machuca y otros (1990, págs. 648-652).

un cierto período de tiempo constante, T. El tamaño del lote solicitado se calcula posteriormente, de forma que se restablezca un cierto *nivel máximo de stocks*, $NI_{máx}$, que no permita la ruptura de los mismos. La representación gráfica sería la que aparece en la Figura 13.11.

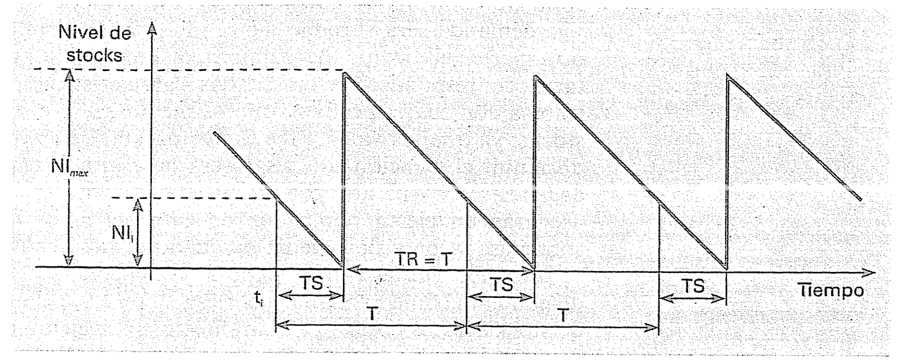


Figura 13.11. Modelo básico de período fijo.

El tamaño del pedido a solicitar en el instante t_i será igual al consumo durante el tiempo que transcurre desde que se emite el pedido hasta que llegue el siguiente, es decir $(TS + T)$[11], menos el stock disponible en ese momento, NI_i, es decir $Q = (D/\theta)(TS + T)\text{-}NI_i = TS * D/\theta + T * D/\theta\text{-}NI_i$. Ahora bien, al ser la demanda constante, conocida y determinística $NI_i = TS * D/\theta$, con lo que $Q_i = T * D/\theta$, luego todos los lotes a pedir serán idénticos y su tamaño coincide con lo que se denominó nivel máximo de stocks, $NI_{máx}$. El problema se centrará, pues, en buscar el valor de T que minimice el coste total. La expresión de los costes es la misma que la empleada en el modelo de cantidad fija de pedido, pero poniendo el valor de Q (en el stock medio) y la frecuencia en función del tiempo. Así pues, tendríamos $f = \theta/T$ y $Q = D/f = D/(\theta/T) = D * T/\theta$, de donde $\Gamma_{TV} = \Gamma_e + \Gamma_p = c_e\theta/T + c_pD * T/2$, y derivando esta expresión con respecto a T e igualándola a cero, se obtendrá el **período óptimo entre pedidos**, T^* que será:

$$T^* = \sqrt{2c_e\theta/c_pD}$$

Sustituyendo este T^* en la fórmula del coste total obtendríamos su valor mínimo, coincidiendo con el obtenido en el modelo básico de cantidad fija de pedido:

$$\Gamma_T^* = c_aD + \sqrt{2c_eD\; c_p\theta}$$

EJEMPLO 13.4. Determinación del período óptimo en un modelo de período fijo

Calcular el valor del período óptimo, T^*, en un sistema de período fijo de las siguientes características:

Demanda anual del producto:	1500 unidades
Coste de emisión de un pedido:	100 u.m.
Coste unitario de posesión:	5 u.m.

Aplicando directamente la expresión $T^* = \sqrt{2c_e\theta/c_p\, D}$, obtenemos $T^* = \sqrt{2 * 100 * 1/5 * 1500} = 0{,}163$ años, ya que ésta ha sido la unidad de tiempo utilizada. Transformándolo en días tendremos $T^* = 0{,}163 * 360 \approx 59$ días.

[11] En caso de que TS fuese mayor que TR se emplearía en su lugar la expresión TS_p, tal como se hizo en el Apartado 13.3.1.1. Aquí, por simplificar, supondremos que no es ese el caso.

13.4. MODELOS DINAMICOS PROBABILISTICOS

Los modelos desarrollados hasta ahora partían de la hipótesis de una demanda constante y conocida; sin embargo, en la mayoría de los casos, y dentro del contexto de demanda independiente, dicha hipótesis será más teórica que realista y la demanda será variable, siguiendo una determinada ley de probabilidad. Por otra parte, el tiempo de suministro, también supuesto conocido y constante, tampoco responderá a las citadas características. Esto nos lleva a que, si se trabaja con sus respectivos valores medios, se corra el riesgo de una ruptura de stocks, ya que los valores reales fluctuarán alrededor de los mismos. Si se quiere disminuir el mencionado riesgo será necesaria la creación de un **stock de seguridad**, SS, para que absorba las posibles fluctuaciones; de esa forma se pretende asegurar un cierto porcentaje de entregas a los clientes cuando la demanda sobrepase la previsión media o cuando el suministro sufra algún retraso.

El valor que se adopte para el *SS* dependerá de la forma en que se mida la demanda máxima probable y el riesgo, con los costes ligados a él, de una ruptura de stocks. Estos costes, ya sean directos (por ejemplo: ventas perdidas) o indirectos (por ejemplo: disminución de la fidelidad del cliente, pérdida de imagen, etc.), deberían ser comparados con los que supone mantener un stock suplementario. Así pues, el estudio completo de la influencia de las rupturas sobre las diferentes políticas en materia de stocks exigiría que se le pudiese asignar un coste a cada ruptura, lo cual es, a menudo, bastante difícil. Debido a ello, suele recurrirse a la definición, por parte de la empresa, de un cierto **nivel de servicio**, NS, y comparar los costes que éste implica con el de otros niveles a fin de escoger el que se juzgue más adecuado. De entre las diferentes maneras con las que se puede medir el nivel de servicio vamos a mencionar dos de ellas, la primera es el *cociente entre el número de períodos en los que no se produce ruptura y el total de períodos considerados*; la segunda es el *cociente entre el número de unidades expedidas a los clientes sin retraso y el número total de unidades demandadas por los mismos*. Ambas definiciones originarán un número comprendido entre 0 y 1, representando el primero que ninguna demanda es satisfecha a tiempo y el segundo un servicio perfecto. También se puede hablar de un determinado **riesgo de ruptura**, variable complementaria del nivel de servicio, que se calcula como el *número de períodos en los que se produce ruptura frente al número de períodos totales considerados*, o bien como el *número de unidades expedidas con retraso a los clientes frente al número total de unidades solicitadas por los mismos*.

13.4.1. Modelo básico de cantidad fija de pedido con demanda aleatoria y tiempo de suministro constante

Recordemos que en el modelo básico se emite una orden cuando el nivel de inventarios en almacén alcanza un valor igual al punto de pedido, es decir, cuando se disponga de inventarios suficientes para satisfacer un cierto nivel de demanda durante el tiempo de suministro. De acuerdo con ello, llamando $\bar{d}$ a la **demanda media diaria**, el punto de pedido vendría dado por $P_p = \bar{d} * TS_p$. Por la forma de controlar los inventarios con este modelo (ver Apartado 13.2.1), la ruptura sólo podrá presentarse a partir del momento de emisión del pedido (pues antes el nivel de stocks es mayor o igual que el P_p), por lo que, si se quiere disminuir el riesgo de ruptura que conlleva la formulación anterior, habrá que

añadir un **stock de seguridad**, *SS*. De esta manera, la expresión del **punto de pedido** se transforma en

$$P_p = SS + \bar{d} * TS_p$$

Y llamando $\bar{D}_{TS}$ a la demanda media durante *TS*, $P_p = SS + \bar{D}_{TS}$.

Esto hace aumentar el coste de posesión que, en cada unidad de tiempo, se ve aumentado en $c_p SS$; dado que este nuevo sumando en los costes no depende de Q, no variará el tamaño del lote óptimo a pedir. Teniendo en cuenta que la demanda que se utiliza es la media, el término D/θ que aparece en la expresión $\sqrt{2c_e D/c_p \theta}$, que define a Q^* se puede sustituir por $\bar{d}$, obteniéndose:

$$Q^* = \sqrt{2c_e \bar{d}/c_p}$$

La representación gráfica de un sistema como el expuesto sería la correspondiente a la Figura 13.12. En ésta se puede observar cómo la demanda es variable, pudiendo llegar a ocurrir que el stock de seguridad sea utilizado antes de la llegada del reaprovisionamiento (punto A), cumpliendo así su misión en este modelo: hacer frente a la ruptura de stocks cuando la demanda sea superior a la media durante el tiempo de suministro. Como se verá en los Ejemplos 13.5 y 13.6, la forma de calcular el *SS* y el P_p dependerá de que la demanda siga o no alguna distribución aleatoria concreta.

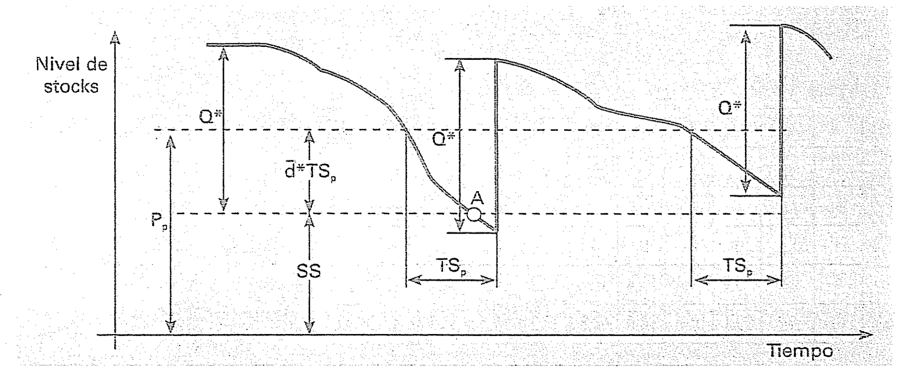


Figura 13.12. Comportamiento de los inventarios con un modelo de cantidad fija de pedido y demanda aleatoria.

EJEMPLO 13.5. Determinación del punto de pedido y stock de seguridad en un modelo de CFP con demanda aleatoria sin conocer su función de distribución

A. Método tabular

Supongamos que, una vez eliminados los factores estacionales y de tendencias por cualquiera de los métodos conocidos, los niveles de demanda producidos a lo largo de una serie de períodos de tiempo iguales al tiempo de suministro es la que se reproduce en la Tabla 13.1, D_{TS_p}. En ella, la frecuencia, f_i, representa el número de veces que la demanda alcanza el nivel indicado en la columna correspondiente.

Tabla 13.1. Valores de la demanda durante el TS_p

D_{TS_p}	400	600	800	1000	1200	1400	1600	1800	2000
f_i	1	4	12	24	30	20	16	4	2

Con estos datos podemos calcular la demanda media durante TS_p ($\bar{D}_{TS_p}$) como $\sum_{i=1}^{9} f_i * D_{TS_{pi}} / \sum_{i=1}^{9} f_i = 1214$.

A partir de aquí estamos en disposición de definir el stock de seguridad necesario para intentar dar un determinado nivel de servicio o tener un cierto riesgo de ruptura. Para ello ampliaremos la tabla anterior con una serie de filas, obteniendo así la Tabla 13.2. La primera de ellas (fila III) expresa la *frecuencia acumulada*, f_{ai}, o número de veces en que la demanda fue menor o igual que la expresada en la columna en cuestión. La fila IV indica el *stock de seguridad necesario mínimo*, $SS_{mín}$, para poder satisfacer la demanda representada en la columna correspondiente; éste es igual a dicha demanda menos la demanda media calculada anteriormente (en los casos en que aquélla sea inferior a la media se obtendrá un valor negativo pero, dado el concepto de stock de seguridad, daremos a éste un valor nulo). En la fila V situaremos el porcentaje de períodos que se habrían satisfecho sin problemas si el punto de pedido hubiera sido la demanda que figura en la columna en cuestión; de acuerdo con la definición dada anteriormente, éste sería el *nivel de servicio* ofrecido y, para calcularlo, bastará con dividir su frecuencia acumulada entre el máximo de la misma (113) y, para expresarlo en tanto por ciento, multiplicarlo por 100. Por último, la fila VI representará el riesgo de ruptura, obtenido de restarle a 100 el nivel de servicio anteriormente calculado.

Tabla 13.2. Tabla para el cálculo de *NS, RR, SS* y *Pp*

I	D_{TS_p}	400	600	800	1000	1200	1400	1600	1800	2000
II	f_i	1	4	12	24	30	20	16	4	2
III	fa_i	1	5	17	41	71	91	107	111	113
IV	SS_{min}	0	0	0	0	0	186	386	586	786
V	*NS*	0,9	4,4	15,4	36,2	62,8	80,5	94,7	98,2	100
VI	*RR*	99,1	95,6	84,6	63,8	37,2	19,5	5,3	1,8	0

Como veremos a continuación, desde la Tabla 13.2 es fácil responder a cualquier pregunta sobre cualquiera de las variables en ella representadas.

a) **¿Qué stock de seguridad será necesario mantener para dar un nivel de servicio del 90 por 100? ¿Cuál será el punto de pedido?**

Como se puede apreciar en la fila V, el *NS* del 90 por 100 se encuentra situado entre el 80,5 por 100 y el 94,7 por 100, a los que corresponde, respectivamente, un *SS* de 186 y 386; por tanto, el *SS* buscado estará entre ambos, pudiendo hacerse una interpolación para dar respuesta a la pregunta. Así pues, si para una diferencia de 200 unidades (386-186) la cobertura aumenta en 14,2 puntos (94,7-80,5), para 9,5 puntos (90-80,5) harán falta 134 unidades (obtenidas por una simple regla de tres: $200 * 9,5/14,2 \approx 134$). El *stock de seguridad* solicitado será igual a 186 (necesario para dar el 80,5 por 100) más 134 (para conseguir los 9,5 puntos que faltan para llegar a un *NS* del 90 por 100), es decir, *320 unidades*. Esto conlleva a tener un *punto de pedido de* $P_p = \bar{D}_{TS} + SS = 1214 + 320 = 1534$ *unidades.*

b) **¿Qué riesgo de ruptura se tendría con un *SS* de 500 unidades?**

El problema aquí planteado es inverso al anterior. A partir de la Tabla 13.2 se puede observar que, con dicho *SS*, se tendrá un riesgo comprendido entre 5,3 y 1,8 por 100, correspondientes, respectivamente, a unos *SS* de 386 y 586 unidades. La discrepancia de tres puntos y medio entre los riesgos de ruptura (5,3-1,8 = 3,5) corresponden a las 200 unidades de diferencia entre los *SS*; por tanto, interpolando linealmente, para las 114 unidades adicionales que implica el *SS* propuesto (500-386), encontramos que el riesgo de ruptura disminuiría aproximadamente en un 2 por 100 respecto al que provocaría un $SS = 386$, $(114 * 3,5/200 \approx 2)$, es decir, se tendrá un *RR* igual a 5,3-2 = *3,3* por 100.

De igual forma se podría responder con respecto a los niveles de servicio o riesgos de ruptura que se tendrían al utilizar un determinado punto de pedido, ya que este coincidiría con D_{TS_p} (fila I).

B. Método gráfico

Gráficamente, también se podría haber resuelto cualquiera de estas cuestiones (ver Figura 13.13, que corresponde a los datos de la Tabla 13.2). Situando en las abscisas de unos ejes coordenados la demanda durante el tiempo de suministro y en ordenadas la frecuencia acumulada (eje 1), o el nivel de servicio (eje 2), o el riesgo de ruptura (eje 3), podría procederse a una lectura directa sin ser necesaria la interpolación. De todas formas, es conveniente recordar que la precisión de estos métodos gráficos siempre es inferior a la obtenida matemáticamente a través de la interpolación.

A la vista de ésta podríamos responder a preguntas como:

a) **¿Qué nivel de servicio y riesgo de ruptura se ofrece si no se mantiene *SS*?**

Al no mantener ningún stock de seguridad, se está utilizando un punto de pedido igual a la demanda media durante el tiempo de suministro, es decir, 1214 unidades (ver subapartado A). Localizando esta cantidad en el eje de abscisas (caso A), y llevándosela a la curva de la figura, puede encontrarse en el eje 2 un *NS* aproximado del 64 por 100, o, lo que es lo mismo, un riesgo de ruptura del 36 por 100 sobre el eje 3[12].

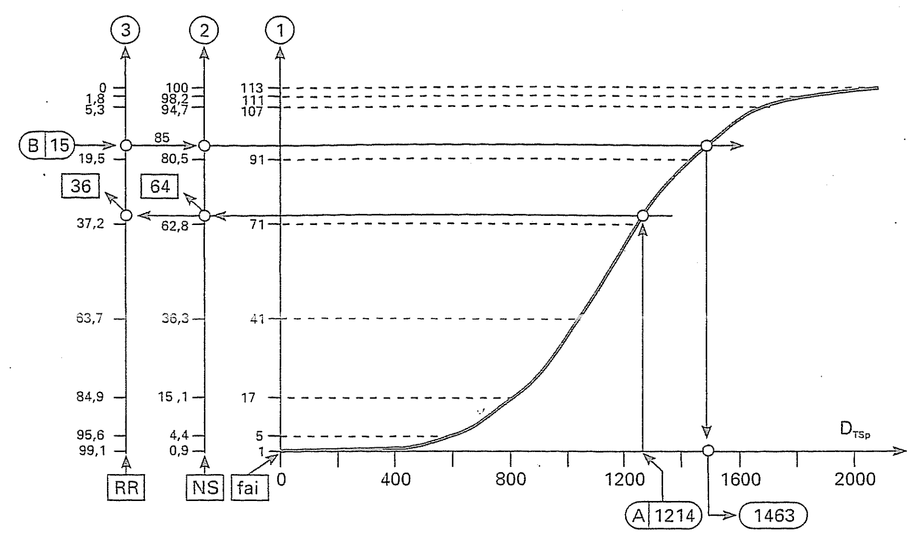


Figura 13.13. Curva de *NS* y *RR* con respecto a $D\ TS_p$.

b) **¿Qué *SS* habrá que tener para ofrecer un *RR* del 15 por 100?**

Partiendo del 15 por 100 en el eje del riesgo de ruptura (caso B), que corresponde al 85 por 100 de nivel de servicio, se puede observar que corresponde a una demanda de 1463. Este valor sería el punto de pedido a utilizar, ya que la demanda real durante *TS* lo superaría sólo en un 15 por 100 de los casos; por otra parte, como $Pp = \bar{D}_{TS_p} + SS$, se puede deducir que $SS = Pp - \bar{D}_{TS_p} = 1463 - 1214 = 249$ *unidades.*

El método anteriormente expuesto trae consigo un trabajo bastante largo y penoso de recopilación de datos para la demanda de cada artículo. Esto hace que, a pesar de ser muy intuitivo, resulte poco práctico, sobre todo cuando se trate del estudio de varios items. Los cálculos se simplifican notablemente si se puede justificar la **hipótesis de que la demanda sigue alguna distribución aleatoria conocida.** El *procedimiento a seguir* es el mismo en todas las distribuciones:

- Se determina la aplicabilidad de la función de distribución para la demanda durante el tiempo de suministro.
- Se decide un nivel de servicio por parte de la empresa.
- Se calcula la demanda máxima razonable, $D_{TS_{máx}}$, durante el TS_p, basándonos en la distribución apropiada y en el nivel de servicio elegido.
- El punto de pedido se hace igual a la $D_{TS_{máx}}$.
- Se obtiene el stock de seguridad necesario a partir de la expresión $SS = D_{TS_{máx}} - \bar{D}_{TS}$.

[12] Calculadas estas cantidades por interpolación, los valores obtenidos serían, respectivamente 64,04 y 35,96 por 100.

EJEMPLO 13.6. Determinación del punto de pedido y stock de seguridad en un modelo de CFP con demanda aleatoria con función de distribución conocida

Como ejemplo de aplicación, supongamos que la demanda expuesta en el ejemplo anterior se distribuye según una normal de media 1200 y desviación típica 200[13]; con estos datos y con la ayuda de la tabla de la normal tipificada podremos contestar a las preguntas que nos hacíamos anteriormente:

a) **¿Qué stock de seguridad será necesario mantener para dar un nivel de servicio del 90 por 100?**

Tendremos que calcular la demanda que, durante el tiempo de suministro, no será superada en un 90 por 100 de períodos. Buscando en las tablas, se puede ver que el valor de la variable tipificada que más se aproxima a éste es $z = 1{,}28$, luego como $z = (D_{TS_{máx}} - \bar{D}_{TS})/\sigma$, tendremos:

$$D_{TS_{máx}} = \bar{D}_{TS} + \sigma z = 1200 + 200 * 1{,}28 = 1456$$

Este sería el *punto de pedido* a utilizar, dando lugar a $SS = P_p - \bar{D}_{TS} = 1456 - 1200 = 256$ *unidades.*

b) **¿Qué riesgo de ruptura se tendría con un SS de 500 unidades?**

El stock de seguridad mencionado equivale a decir que el punto de pedido utilizado es $P_p = \bar{D}_{TS} + SS = 1200 + 500$, es decir, que se podrá soportar una demanda máxima de 1700 unidades durante el TS_p. Tipificándola y buscando en tablas tendremos:

$$P(D_{TS_{máx}} \leqslant 1700) = P(z \leqslant (1700 - 1200)/200) =$$
$$= P(z \leqslant 500/200) = P(z \leqslant 2{,}5) = 0{,}9938$$

Este sería, en tanto por uno, el *nivel de servicio* obtenido, lo que hace que se produzca un *riesgo de ruptura* de 100 − 99,38 = 0,62 por 100.

13.4.2. Modelo básico de cantidad fija de pedido con demanda constante y tiempo de suministro aleatorio

En el Apartado 13.4.1 hemos trabajado con la demanda durante el tiempo de suministro (es decir, del producto de TS por la demanda/unidad de tiempo) considerando que la demanda era variable. En el presente caso será el tiempo de suministro el que tendrá carácter variable; sin embargo, el procedimiento a emplear es análogo al del apartado precedente, pues la variable fundamental sigue siendo la demanda durante el tiempo de suministro, por lo que el P_p se definirá de la misma manera: $P_p = \bar{D}_{TS} + SS$. La diferencia es que, ahora, el P_p, o demanda máxima aceptable durante TS, se definirá como $D_{TS_{máx}} = d * TS_{máx}$, siendo $TS_{máx}$ el valor máximo de TS que la empresa aceptará cubrir con su stock de seguridad. Por tanto: $P_p = D_{TS_{máx}} = \bar{D}_{TS} + SS \Rightarrow D_{TS_{máx}} = d * \overline{TS}_p + SS$, de donde $SS = d(TS_{máx} - \overline{TS}_p)$. Resumiendo, se puede decir que, si antes, para dar un cierto nivel de servicio, se calculaba una demanda que no fuera superada un determinado número de veces, ahora se buscará un tiempo de suministro que cumpla las mismas condiciones, pues es éste el que introduce aleatoriedad en D_{TS}. El Ejemplo 13.7 ilustra lo aquí expuesto.

EJEMPLO 13.7. Determinación del punto de pedido y del stock de seguridad en un modelo CFP con tiempo de suministro aleatorio conociendo su función de distribución

El tiempo de suministro de un determinado ítem, que sufre una demanda diaria de 250 unidades, se distribuye según una normal de media 10 días y desviación típica 2. Se desea conocer cuál será el punto de pedido y el SS necesario para poder ofrecer un nivel de servicio del 93 por 100.

Realizando el mismo proceso que en el Ejemplo 13.6, se procederá a localizar el valor de z que tiene una probabilidad del 93 por 100 de no ser superado, que corresponde aproximadamente a 1,48. Dado que la variable aleatoria es TS, podemos poner: $z = (TS_{máx} - \overline{TS})/\sigma$, de donde $TS_{máx} = \overline{TS} + \sigma z = 10 + 2 * 1{,}48 = 12{,}96$, con lo que:

$$P_p = D_{TS_{máx}} = 250 * 12.96 = 3240 \text{ un.}$$

Luego el *stock de seguridad* será:

$$SS = d(TS_{máx} - \overline{TS}) = 250 * (12{,}96 - 10) = 740 \text{ un.}$$

[13] Siempre se utilizará una desviación típica, σ, referida al mismo intervalo de tiempo que se emplee en la variable demanda.

13.4.3. Modelo básico de período fijo con demanda variable y tiempo de suministro constante

Como ya se vio en el Apartado 13.3.2, este tipo de modelo se centraba en el cálculo del período óptimo, T^*, entre dos pedidos consecutivos. El pedido a realizar, Q, junto con el stock que se poseía en el momento de emisión, NI, deberían cubrir la demanda existente durante $T^* + TS$, D_{T^*+TS} (ver Figura 13.11); por tanto, la expresión que definiría el lote sería $Q = d(T^* + TS) - NI$, donde «d» es la demanda por unidad de tiempo. Se deduce fácilmente que la cobertura frente a las rupturas durante $T^* + TS$ va a depender del valor que se tome para «d» en la expresión anterior, pues es la única variable aleatoria. Generalmente, como se hizo en el Apartado 13.4.1, se tendrá en cuenta una demanda máxima, $d_{máx}$, que no sea superada un determinado porcentaje de veces, definiendo este porcentaje el *nivel de servicio deseado.* Así pues, el stock de seguridad necesario en este caso sería la diferencia entre el $Q_{máx}$ obtenido con esta demanda y el Q calculado a partir de la demanda media, $\bar{d}$, pudiendo expresarse como:

$$SS = Q_{máx} - Q = [d_{máx}(T^* + TS) - NI] - [\bar{d}(T^* + TS) - NI] =$$
$$= (d_{máx} - \bar{d})(T^* + TS)$$

Para el cálculo de $d_{máx}$ se utilizarán los mismos procedimientos expuestos en los Ejemplos 13.5 y 13.6, dependiendo de si se conoce o no la función de distribución de la demanda. En el Ejemplo 13.8 supondremos, por comodidad, que dicha función se conoce.

EJEMPLO 13.8. Determinación del stock de seguridad en un modelo de PF con demanda aleatoria de función de distribución conocida

Para la gestión de stocks de un determinado ítem, cuya demanda «d» se distribuye según una normal de media 50 y desviación típica 5, se ha decidido utilizar un modelo de período fijo, cuyo valor óptimo es $T^* = 30$ días. Se desea conocer cuál será el stock de seguridad necesario para ofrecer un nivel de servicio del 90 por 100 si $TS = 1$ semana.

Con los datos de la demanda habrá que calcular cuál será aquella que no sea superada el 90 por 100 de las veces. Según la tabla de la normal tipificada, el valor de z que cumple esa condición es 1,28; a partir de dicho valor podremos saber cuál es la demanda máxima que buscamos: $1{,}28 = (d_{máx} - \bar{d})/\sigma \Rightarrow$

$$\Rightarrow d_{máx} = \bar{d} + 1{,}28\sigma = 50 + 1{,}28 * 5 = 56{,}4.$$

Luego el SS solicitado será $SS = (d_{máx} - \bar{d})(T^* + TS) = (56{,}4 - 50)(30 + 7) = 236{,}8 \approx 237$ unidades.

13.4.4. Modelo básico de período fijo con demanda constante y tiempo de suministro variable

En este caso, para determinar el stock de seguridad, se operará de la misma forma que en el caso anterior, pero teniendo en cuenta que la variable aleatoria es el TS, por lo que para conseguir un cierto nivel de servicio habrá que considerar la distribución de esta última. Así pues, para un cierto nivel de servicio deseado, NS_D, habrá que considerar un valor $TS_{máx}$ que no sea sobrepasado en un porcentaje de veces igual al indicado para NS_D. De acuerdo con ello, el lote a solicitar sería $Q_{máx} = d(T^* + TS_{máx}) - NI$, y el stock de seguridad se definiría como:

$$SS = Q_{máx} - Q = [d(T^* + TS_{máx}) - NI] - [d(T^* + \overline{TS}_p) - NI] = d(TS_{máx} - \overline{TS}_p)$$

El procedimiento para calcular $TS_{máx}$ sería análogo al empleado en el Ejemplo 13.7, pero sustituyendo ahora dicho valor en las fórmulas de $Q_{máx}$ y SS obtenidas en el párrafo anterior.

13.4.5. Aleatoriedad en la demanda y en el tiempo de suministro

Cuando tanto el tiempo de suministro como la demanda están sujetos a variaciones significativas alrededor de sus respectivos valores medios, el cálculo del stock de seguridad se vuelve bastante más complicado. Incluso si se conocen las distribuciones estadísticas de ambas magnitudes, no se podrá calcular directamente, como en los casos expuestos anteriormente, la relación que liga al stock de seguridad con la ruptura de stocks. Este tipo de problemas se puede resolver mediante simulación. En el Ejemplo 13.9 lo haremos utilizando el conocido como **método de Montecarlo.**

EJEMPLO 13.9. Utilización del método de Montecarlo en la gestión de stocks

Supongamos que una muestra representativa de los datos históricos de la demanda diaria, d_i, de un determinado ítem, que se gestiona mediante un modelo de CFP, tomadas en 24 días elegidos al azar, junto con los del tiempo de suministro, TS_j, medido en 18 ocasiones, son los reflejados en las Tablas 13.3 y 13.4. El proceso a seguir se describe a continuación.

Tabla 13.3. Demanda diaria

d_i	0	1	2	3	4	5	6	7
f_i	3	4	6	4	3	2	1	1

Tabla 13.4. Tiempos de suministro

TS_j	4	5	6	7	8	9	10
f_j	4	5	3	2	2	1	1

a) Se calculan las frecuencias acumuladas, f_{ai} y f_{aj}, *para cada* d_i *y* TS_j, *traduciéndolas* a continuación *a una escala de probabilidades acumuladas,* p_{ai} y p_{aj}, en las que aquéllas se expresan en tanto por uno. El resultado aparece en las Tablas 13.5 y 13.6.

Tabla 13.5. Frecuencias y probabilidades acumuladas para la demanda diaria

d_i	0	1	2	3	4	5	6	7
f_i	3	4	6	4	3	2	1	1
f_{ai}	3	7	13	17	20	22	23	24
p_{ai}	0,13	0,29	0,54	0,71	0,83	0,92	0,96	1

Tabla 13.6. Frecuencias y probabilidades acumuladas para los tiempos de suministro

TS_j	4	5	6	7	8	9	10
f_j	4	5	3	2	2	1	1
f_{aj}	4	9	12	14	16	17	18
p_{aj}	0,22	0,5	0,67	0,78	0,89	0,94	1

b) A cada una de las probabilidades acumuladas se le asocia un intervalo comprendido entre $(100 * p_{ai-1})$ y $(100 * p_{ai} - 1)$[14]. Así, por ejemplo:

- Para $d_1 = 0$, tenemos $p_{a1} = 0{,}13$, de donde el intervalo correspondiente será $I_1 \equiv (100 * 0) \div (100 * 0{,}13 - 1)$, es decir: $I_1 \equiv 0 \div 12$.
- Para $d_2 = 1$, $p_{a2} = 0{,}29$, que definirá un intervalo $I_2 \equiv (100 * 0{,}13) \div (100 * 0{,}29 - 1)$, es decir: $I_2 \equiv 13 \div 28$.
- Etc.

Realizando esta operación para cada d_i y TS_j obtendremos las Tablas 13.7 y 13.8.

Tabla 13.7. Intervalos para la demanda diaria

d_i	0	1	2	3	4	5	6	7
p_{ai}	0,13	0,29	0,54	0,71	0,83	0,92	0,96	1
I_i	0 ÷ 12	13 ÷ 28	29 ÷ 53	54 ÷ 70	71 ÷ 82	83 ÷ 91	92 ÷ 95	96 ÷ 99

Tabla 13.8. Intervalos para el tiempo de suministro

TS_j	4	5	6	7	8	9	10
p_{aj}	0,22	0,50	0,67	0,78	0,89	0,94	1,00
I_j	0 ÷ 21	22 ÷ 49	50 ÷ 66	67 ÷ 77	78 ÷ 88	89 ÷ 93	94 ÷ 99

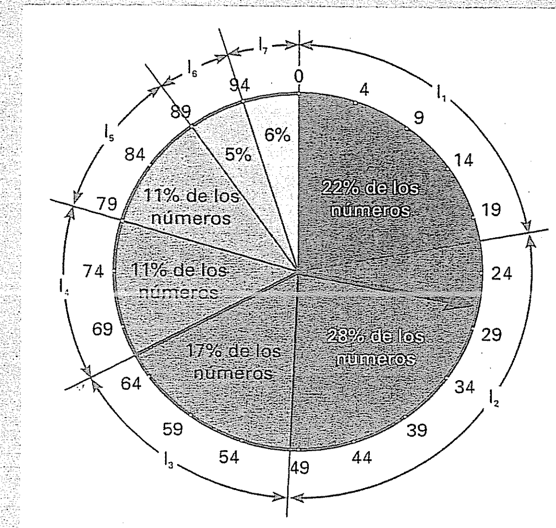


Figura 13.14. Ruleta con los intervalos del tiempo de suministro.

La asociación de intervalos a las probabilidades acumuladas puede comprenderse fácilmente utilizando una analogía. Imaginemos que los 100 valores comprendidos entre 0 y 99 de la Tabla 13.8 integran una ruleta como la de la Figura 13.14[15].

Es obvio que, al girar la flecha, existe un 22 por 100 de probabilidades de que se pare en I_1, un 28 por 100 de que lo haga en I_2, un 17 por 100 en I_3, etc., lo cual coincide exactamente con la probabilidad de ocurrencia de diferentes TS_j (ver Tabla 13.8): $TS = 4 \rightarrow 0{,}22$, $TS = 5 \rightarrow 0{,}5 - 0{,}22 = 0{,}28$, $TS = 6 \rightarrow 0{,}67 - 0{,}5 = 0{,}17$, etc. Queda claro, pues, el paralelismo existente entre la probabilidad de que salga un número de un cierto intervalo, I_j, y la probabilidad de que se dé un determinado tiempo de suministro TS_j. De forma análoga ocurre con las demandas d_i y sus respectivos intervalos I_i.

c) Simulación del fenómeno real para un *modelo de CFP.*

Aunque d_i y TS_j se podrían simular mediante sendas ruletas análogas a la de la Figura 13.14, en la práctica se utilizan las tablas de números al azar[16], en las que se escoge un número entre 0 y 99. Hecho esto, se ve a qué intervalo pertenece (utilizando las Tablas 13.7 y 13.8) y, a partir de éste, se determina el valor de la variable simulada (d_{is} o TS_{js}). Así, si para simplificar, suponemos que es aceptable una muestra de 14 valores, escogeremos otros tantos números al azar para d_i y para TS_j, llegando al resultado expuesto en la Tabla 13.9. En la práctica, el número de simulaciones suele ser muy elevado, por lo que resulta indicado el uso de un ordenador.

Si suponemos que cada d_{is} de la Tabla 13.9 se da durante todo el TS_{js} de la fila correspondiente, podemos calcular las demandas simuladas para el tiempo de suministro, D_{TS_s}, que aparecen en la séptima columna de la misma tabla. Si a cada uno de estos valores le sustraemos la demanda media, $\overline{D}_{TS} = \overline{d}_i * \overline{TS}_j$, obtendremos el stock de seguridad que hubiese sido necesario, SS_{Ns}, para que en el período simulado, s, no hubiese aparecido ruptura. Los valores de $\overline{d}_i$ y de $\overline{TS}_j$ se obtienen a partir de la información de las Tablas 13.3 y 13.4:

$$\overline{d}_i = \sum_{i=1}^{8} d_i f_i / \sum_{i=1}^{8} f_i = (0 * 3 + 1 * 4 + 2 * 6 + 3 * 4 + 4 * 3 + 5 * 2 + 6 * 1 + 7 * 1)/24 = 2{,}625$$

[14] Hubiera sido análogo considerar el intervalo comprendido entre $(100p_{ai-1} + 1)$ y $(100p_{ai})$.
[15] Ver J. A. D. Machuca y otros (1990, pág. 690 y ss.).
[16] Ver Apéndice estadístico a la presente obra.

$$\overline{TS}_j = \sum_{i=1}^{7} TS_j f_j / \sum_{i=1}^{7} f_j = (4 * 4 + 5 * 5 + 6 * 3 + 7 * 2 + 8 * 2 + 9 * 1 + 10 * 1)/18 = 6.$$

Con lo que $\bar{D}_{TS} = \bar{d}_i * \overline{TS}_j = 2{,}625 * 6 = 15{,}75 \approx 16$. La existencia de valores de SS_{Ns} nulos o negativos en la Tabla 13.9 indica simplemente que no hubiese sido necesario mantener stock de seguridad en el período simulado.

A partir de los resultados obtenidos en la última columna de la Tabla 13.9 puede deducirse el nivel de servicio suministrado por los distintos stocks de seguridad. Para ello se ha de tener en cuenta únicamente que, si se decidiese mantener un cierto valor de *SS*, se produciría ruptura en aquellos períodos en que SS_{Ns} fuese mayor que el mantenido. Así pues:

- Si se decide no mantener stock de seguridad, $SS = 0$, habrá ruptura siempre que $SS_{Ns} > 0$, es decir, 5 de los 14 períodos simulados, por lo que $RR = 5/14 = 35{,}7 \approx 36$ por 100, lo que implica un nivel de servicio del 64 por 100.
- Si se decide mantener una unidad de *SS*, el *RR* sería exactamente igual que el del caso anterior.
- Si tenemos dos unidades de *SS*, sólo habrá ruptura en tres ocasiones, con lo que $RR = 3/14 = 21{,}4 \approx 21$ por 100, ofreciendo, por tanto, un nivel de servicio del 79 por 100.

Núm. al azar		Intervalos		d_s	TS_s	D_{TS_s}	SS_{N_s}
Para *d*	Para *Ts*	Para *d*	Para *Ts*				
52	93	29 ÷ 53	89 ÷ 93	2	9	18	2
96	58	96 ÷ 99	50 ÷ 66	7	6	42	26
37	91	29 ÷ 53	89 ÷ 93	2	9	18	2
50	83	29 ÷ 53	78 ÷ 88	2	8	16	0
23	46	13 ÷ 28	22 ÷ 49	1	5	5	−11
10	79	00 ÷ 12	78 ÷ 88	0	8	0	−16
11	84	00 ÷ 12	78 ÷ 88	0	8	0	−16
87	23	83 ÷ 91	22 ÷ 49	5	5	25	9
17	61	13 ÷ 28	50 ÷ 66	1	6	6	−10
46	48	29 ÷ 53	22 ÷ 49	2	5	10	−6
58	13	54 ÷ 70	00 ÷ 21	3	4	12	−4
96	47	96 ÷ 99	22 ÷ 49	7	5	35	19
2	52	00 ÷ 12	50 ÷ 66	0	6	0	−16
26	28	13 ÷ 28	22 ÷ 49	1	5	5	−11

Tabla 13.9. Demandas simuladas durante *TS* y *SS*

De esta forma se obtiene la Tabla 13.10, donde el mayor valor de *SS* coincide con el máximo de SS_{Ns} de la Tabla 13.9.

De los resultados obtenidos en la Tabla 13.10 se puede deducir que, si se desea obtener un nivel de servicio del 80 por 100, bastaría con mantener un *SS* de 9 unidades, lo que daría lugar a un punto de pedido igual al consumo medio durante el *TS* medio más el stock de seguridad; así pues: $NS = 80$ por $100 \rightarrow SS = 9 \rightarrow P_p = 16 + 9 = 25$.

d) Caso de período fijo

Si el modelo a utilizar hubiera sido de período fijo, el proceso hubiera sido similar al seguido en este ejemplo, la diferencia sería que en la Tabla 13.10 habría aparecido la columna $D_{(TS+T^*)}$, en la que se representaría la demanda que se sufriría en el período $TS + T^*$, calculada como el producto de la demanda simulada por la suma del período óptimo entre reaprovisionamientos, T^*, más el tiempo de suministro simulado, TS_s. La columna del *SS* se calcularía como la diferencia entre ésta y la demanda media durante el período $T + TS$.

SS	0	1	2	8	9	18	19	25	26
Núm. de veces, *nR*, en que SS_{NS} > SS	5	5	3	3	2	2	1	1	0
Riesgo de ruptura RR=$_{nR}$/núm. simulaciones	36	36	21	21	14	14	7	7	0
Nivel de servicio NS = 100 – RR	64	64	79	79	86	86	93	93	100

Tabla 13.10. Riesgo de ruptura y nivel de servicio.

13.5. ALGUNAS CONSIDERACIONES SOBRE LOS SISTEMAS DE CFP Y DE PF

Como se desprende de los apartados anteriores, los *sistemas de Período Fijo* tienen la *ventaja* de una reposición de inventarios programada y de menor frecuencia en la verificación del nivel de inventarios (sólo cada vez que transcurre T^*); ello facilita la nivelación de la carga de trabajo del personal encargado del control y del de compras, disminuyendo así los costes de gestión. Sin embargo, también presenta *desventajas;* así, en caso de rupturas de stock, éstas sólo se detectarían en el momento de revisión, pudiendo dar lugar a la permanencia de las mismas durante largo tiempo (ello conlleva el mantenimiento de elevados stocks de seguridad). Por otra parte, otro inconveniente ya mencionado es el posible mantenimiento de elevados niveles de inventario en caso de demanda débil, que se traduce, además, en pedidos de escaso volumen, que pueden resultar innecesarios y antieconómicos, los cuales mantendrían el stock en un nivel cercano al máximo. Esto último no se produciría si se utilizase un *Sistema de Revisión Continua y Cantidad Fija de Pedido*, pues las emisiones se retrasarían hasta que los inventarios llegaran al punto de pedido; también las rupturas se detectarían antes, dado el carácter continuo de la revisión. Estas razones hacen que los sistemas CFP den lugar a un menor volumen del stock medio. Sin embargo, tampoco están exentos de *inconvenientes*, pues, al contrario que los sistemas SPF, los momentos de emisión son variables, lo cual dificulta la programación y la coordinación con los proveedores y, además, la revisión suele resultar más cara debido a su carácter continuo[17].

De acuerdo con lo anterior, la elección de un sistema u otro está sujeta a la consideración de distintos factores, tales como la cuantía de los costes de posesión, las características idóneas de la programación de los reaprovisionamientos y el tipo de revisión más adecuada. Para tener en cuenta el primer factor, la clasificación ABC de los distintos items, estudiada en el Apartado 1.4.3.1, constituye un valioso instrumento. A continuación damos algunas pautas que, consideradas en conjunto, podrían servir de guía en la elección del sistema más adecuado, aunque dicha relación es indicativa y no exhaustiva[18]:

[17] Los medios informáticos están haciendo que este hecho vaya perdiendo importancia.
[18] Ver, por ejemplo, J. A. D. Machuca (1978, pág. 84 y ss.), Schroeder (1993, pág. 601).

- Para items del tipo A es más conveniente un sistema CFP; para los elementos de la clase B puede bastar, la mayoría de las veces, con un SPF. Por lo que respecta a los del sector C, pueden emplearse sistemas de gestión muy aproximados, como por ejemplo un sistema de mínimo-máximo en el que este último represente la mitad del valor anual del ítem y el mínimo el correspondiente a dos o tres meses de uso.
- Si los items objeto de control son considerados importantes (por ejemplo: componentes críticos para reparación) debe realizarse una revisión continua, aunque por su valor pudiera estar clasificado en la zona C de la curva ABC.
- Si existen unos lotes mínimos impuestos por el proveedor es aconsejable el sistema CFP, pues éste facilita respetar las condiciones impuestas ajustando definitivamente el lote; se evita así el ajuste del mismo que, en cada reaprovisionamiento, traería consigo el SPF. Por el contrario, si el mínimo mencionado procede de la suma de un conjunto de lotes procedentes del mismo proveedor, este último sistema proporciona mayor flexibilidad.
- Cuando los pedidos deban hacerse a intervalos fijos (por ejemplo: reparto de productos alimenticios a minoristas) suele ser preferible el SPF.

13.6. PLANIFICACION DE LOS RECURSOS DE DISTRIBUCION: DRP (*DISTRIBUTION RESOURCE PLANNING*)[19]

Como se indicó en la introducción, no todas las unidades de producción distribuyen directamente sus productos hacia los consumidores finales; en algunos casos, la distribución se realiza a lo largo de una red de almacenes situados a distintos niveles, a través de los cuales van pasando los items hasta llegar a los clientes finales (ver Figura 13.15).

En estos casos, *la única demanda independiente sería la de los puntos de venta en contacto con el mercado* (almacenes C, D, E, G, H y, parcialmente, F), *el resto*, es decir, las necesidades de productos de los centros situados en otros niveles de la red, *sería demanda dependiente*. Así, en la Figura 13.15, la demanda del centro F tendrá en cuenta, además de los pedidos de clientes, los de aprovisionamiento del centro H (que no tienen por qué coincidir con la demanda final de éste, ya que los pedidos dependerán del método de cálculo del lote, del nivel de stock de seguridad, etc.). En este tipo de empresas, por los mismos motivos apuntados en el Apartado 4.1, no resulta idónea la aplicación de los métodos clásicos de gestión de stocks que hemos visto en los apartados precedentes, apareciendo el **DRP** como método alternativo para la planificación y control de los inventarios en dicho caso.

13.6.1. Método de cálculo del DRP

El cálculo de necesidades en DRP se basa en la aplicación de los conceptos de MRP a distribución, de forma que cada centro emite sus pedidos a los de nivel superior con la antelación suficiente para que sean recibidos en la cantidad y momento adecuados. El Ejemplo 13.10 ilustra el proceso mencionado.

[19] Apartado elaborado por María del Mar González Zamora. Para un tratamiento más amplio puede verse, por ejemplo, Scott (1994, Capítulo 23).

EJEMPLO 13.10. Planificación de las necesidades de distribución (DRP)

La empresa GIDEAO, dedicada a la fabricación y venta de aparatos electrodomésticos cuenta con la estructura de distribución representada en la Figura 13.15.

Para simplificar, consideraremos sólo los cálculos relativos al almacén regional A, sabiendo que se procedería de la misma forma para obtener los relacionados con B y con la fábrica. La demanda prevista para los almacenes locales C y D aparece en la Tabla 13.11, mostrando la Tabla 13.12 la información complementaria necesaria para la aplicación del DRP; ésta equivaldría al segmento maestro de datos y al de estado de inventario en MRP (ver Capítulo 4, Ejemplo 4.2).

Con esta información se genera una explosión de necesidades análoga a la que se realiza con un sistema MRP (ver Apartado 4.2), la cual viene recogida en la Tabla 13.13.

Estos datos, junto con los que salgan del almacén regional B, darían lugar a la programación de los pedidos a fábrica, los cuales servirían de base para la planificación de materiales en la misma, asegurando así las cantidades pedidas por cada centro en el momento indicado.

Tabla 13.11. Demanda de los centros C y D

Período / Almacén	1	2	3	4	5	6
C			50	95		80
D			70		120	90

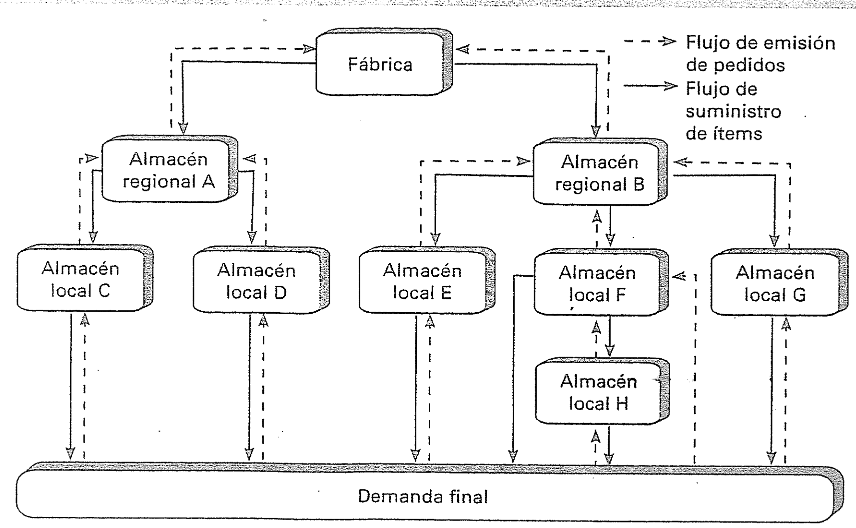


Figura 13.15. Red de distribución de la empresa GIDEAO.

Tabla 13.12. Segmento maestro de datos y de estado de inventarios

Almacén	Stock de seguridad	Método de cálculo del lote	TS (semanas)	Disponibilidad	Recepciones programadas
A	-	Lote a lote	2	-	200 (en $t = 4$)
C	15	Lote a lote (múltiplos de 100)	1	80	-
D	5	Lote a lote	1	75	-

Tabla 13.13. Explosión de necesidades de los almacenes C, D y A

Tamaño lote	TS	Disponible	SS	Comprometido	Almacén	Concep. \ Período		1	2	3	4	5	6
LOTE A LOTE (100)	1	80	15	-	C	NB				50	(95)		80
						D	80	80	80	80	(30)	35	35
						RP					+SS		
						NN				-	(80)		60
						RPPL					(100)		100
						PPL				(100)		100	
LOTE A LOTE	1	75	5	-	D	NB				70		120	90
						D	75	75	75	75	5	5	5
						RP							
						NN				-		120	90
						RPPL						120	90
						PPL					120	(90)	
LOTE A LOTE	2	-	-	-	A	NB				100	(120)	(190)	
						D	0					(80)	
						RP					(200)		
						NN				100	-	110	
						RPPL				100		110	
						PPL		100		110			

Estos cálculos habrían de realizarse para cada producto de la empresa, de forma que se tendrá una programación para cada artículo y para cada centro de distribución. Finalmente, hay que hacer constar que, aunque el procedimiento sea análogo al del MRP, existe, sin embargo, una diferencia fundamental, ésta procede del hecho de que, con DRP, la **programación** se realiza para los **productos terminados**, mientras que con MRP se desarrolla la **programación de los componentes** de cada producto.

13.6.2. Formas de actuación del DRP

Si bien DRP puede actuar como una técnica autónoma, es decir, aplicando el método sólo para la tarea de distribución, también puede funcionar como una extensión de un sistema MRPII, siendo de gran importancia en aquellas compañías en las que se encuentran integradas las operaciones de fabricación y distribución. La importancia de esta actuación conjunta con MRPII se manifiesta por el hecho de que comparten la base de datos, el sistema de previsión de demanda, el sistema de gestión de inventarios, etc., lo cual configura una base importante para una adecuada planificación integrada, tanto a nivel de producción como de distribución.

13.6.3. Principales funciones del DRP

Cuando DRP actúa de manera independiente, como cuando lo hace integrado en un sistema MRPII, posee un conjunto de **funciones propias**, que desempeña con el objetivo de conseguir una planificación racional de la distribución de inventarios. Entre éstas se encuentran:

- *Planificación y emisión de los* **pedidos de abastecimiento**, realizados en base a un sistema de programación maestra (ver Ejemplo 13.10).
- *Seguimiento de los pedidos de abastecimiento*, con el que se pretende controlar los pedidos que se encuentran en camino entre el almacén de suministro y el de recepción.
- *La asignación de suministros* cuando se da escasez de un ítem dentro de la red de distribución. El método empleado es un reparto equitativo entre el centro de destino y el de suministro, el cual se hace en base a los pedidos de los clientes. Si no existe cantidad suficiente de producto en un centro para suministrar a los que están por debajo del mismo en la red de distribución, se puede realizar una transferencia entre almacenes (por ejemplo: podría hacerse entre A y B de la figura del ejemplo).
- *Planificación de la capacidad de envíos.* Al igual que MRPII posee el sistema de planificación de la capacidad conocido como CRP (Apartado 4.1), el módulo DRP también tiene en cuenta las limitaciones de capacidad con las que pueden encontrarse los distintos centros de distribución. Este sistema, conocido como Planificación de la Capacidad de Envíos (*Shipping Capacity Planning*), se basa en el cálculo de la carga por envíos (en función del peso, del volumen unitario, etc.), para, posteriormente, compararla con la capacidad disponible (número de vehículos × la capacidad de los mismos). Caso de no poseer la capacidad necesaria, puede traer consigo ajustes en esta última (por ejemplo: subcontratando vehículos para aumentar la capacidad, utilizando los recursos (vehículos) ociosos en otros centros donde se necesiten, etc.).

Cuando el DRP se usa junto con un módulo de previsión de demanda de MRPII, también desempeña las funciones de:

- *Generación de una previsión de demanda* futura.
- *Cálculo de los niveles de stock de seguridad de cada centro.* Para esto último sólo tiene en cuenta la demanda final de clientes y no los pedidos de cada almacén; con ello se evita inflar la cifra de stock de seguridad a lo largo de toda la red de fabricación/distribución.

Uno de los puntos conflictivos en el tema de la gestión de inventarios es cómo conseguir dar un buen nivel de servicio a clientes en función de la distribución del stock de seguridad entre los distintos centros de distribución. Un estudio realizado por Vollman y otros (1992) pone de manifiesto que se alcanzan los mayores niveles de servicio cuando se distribuye totalmente el stock de seguridad entre los

centros de distribución directa a clientes, siendo menor si se mantiene parte del mismo en un almacén central. También muestra que, sin embargo, considerando el tamaño del stock de seguridad, puede ser más acertada esta última elección ya que, al agregarse la demanda de todos los puntos de distribución a clientes, la variabilidad de aquélla resulta menor que si se considera cada centro por separado, por lo que será necesario un menor volumen de stock de seguridad. Resulta obvio que la elección de un sistema u otro dependerá de si la prioridad de la empresa es dar un elevado servicio a clientes o, por contra, reducir al mínimo la cifra de stock de seguridad.

Esta última tiene una gran importancia, pues complementa a **MRP**. Como ya sabemos, éste determina **cuándo** y **cuánto pedir**, y **DRP** da respuesta, además, al **dónde mantener el inventario**, de forma que el resultado final (en función de los objetivos de la empresa) sea el más adecuado.

13.7. CONSIDERACIONES FINALES

De lo expuesto en las páginas anteriores y en los capítulos precedentes, puede deducirse que las técnicas clásicas de gestión de stocks han sido superadas en muchos entornos productivos por los nuevos métodos de planificación y control de materiales. Ello no quiere decir que no sigan siendo útiles en distintos sectores y para determinadas condiciones, especialmente si lo que se desea es *controlar los niveles de inventario más que el flujo de materiales*. El Cuadro 13.4 (J. A. D. Machuca, 1985) muestra algunas diferencias básicas entre las mencionadas técnicas y los sistemas MRP, más flexibles en mercados dinámicos.

Cuadro 13.4 Comparación de las técnicas clásicas con el MRP

Característica	Técnicas clásicas	MRP
Tipo de demanda	Independiente (aleatoria)	Dependiente (predeterminada)
Determinación de la demanda	Previsión estadística en base a la demanda histórica	Explosión de las necesidades en base al PMP
Distribución demanda	Dispersa y continua	Discreta y discontinua
Tipo de artículos	Finales y piezas de repuesto	Partes y componentes
Tratamiento de los items	Aislado (en general)	Coordinado
Lote empleado	Lote económico (en CFP)	En base a distintas técnicas
Base de los pedidos	Punto de pedido (en CFP)	Necesidades de producción (PMP)
Base de control	Curva ABC	Todos los artículos
Stock de seguridad	Necesario para paliar la aleatoriedad de la demanda	Tiende a desaparecer, salvo en los productos finales
Objetivos directos	Satisfacción del cliente	Satisfacer las necesidades de producción

Independientemente de la validez de las técnicas clásicas en los contextos mencionados, se han realizado intentos de *adaptar la formulación tradicional a la corriente actual de cero inventarios*[20]. En ese sentido, bajo la hipótesis de que el coste de emisión puede disminuir con una adecuada inversión en tecnología (por ejemplo: nuevos métodos, nuevos equipos, etc.) (Porteus, 1985), puede reformularse la expresión de los costes totales introduciendo un nuevo término, $K * I(C_e)$, que tenga en cuenta la citada inversión; en éste, K representaría el coste de capital e $I(c_e)$ la inversión requerida, que sería función del valor de c_e que se desea alcanzar. De acuerdo con ello, los costes totales se formularían, en el caso de cantidad fija de pedido, como:

$$\Gamma_T = c_a * D + c_e * D/Q + c_p * \theta * Q/2 + K * I(C_e)$$

A partir de esta expresión, habría que calcular los valores óptimos de Q y c_e que minimizan los costes totales. Cuando la reducción de inventarios sea conveniente, ello llevará a una disminución del valor de Q^* (pues a él está ligado el stock medio) y de c_e (pues Q^* está relacionado de forma directa con $c_e^{1/2}$ (ver expresión de Q^* en el Apartado 13.3.1.1). La optimización mencionada deberá tener en cuenta que debe haber un límite en la reducción de c_e en las condiciones actuales, la cual no podrá sobrepasarse en tanto no lo permitan nuevos avances tecnológicos. Si no es posible establecer una relación clara entre c_e e $I(c_e)$, se procederá por tanteo hasta encontrar una solución satisfactoria (ver McLain y otros, 1992, pág. 218 y ss.).

Otro aspecto digno de mención antes de finalizar el presente capítulo es el referente a la posible existencia de *factores de tendencia y estacionalidad en la demanda*. En dicho caso, la demanda media aplicada en las fórmulas de los modelos estudiados no podría considerarse constante, por lo que habría que adaptar la formulación utilizando una demanda que tuviera en cuenta dichos factores y que se actualizara convenientemente, por ejemplo, mediante métodos de alisado exponencial[21]. Con ello irán adaptándose con el tiempo los valores de Q^* y P_p o, en su caso, de T^* y Q; asimismo, también cambiaría la desviación típica, que debería actualizarse de la misma forma.

[20] Ver, por ejemplo Porteus E. L. (1985 y 1986) y Zangwill (1987).
[21] Ver, por ejemplo Schroeder (1993, pág. 603) o Aquilano y Chase (1991, págs. 416-463).

REFERENCIAS Y BIBLIOGRAFIA

AQUILANO, N. J.; CHASE, R. B.: «Fundamentals of Operations Management». Irwin, 1991.

DILWORTH, J. B.: «Production and Operations Management. Manufacturing and Services», McGraw-Hill, 1993.

DOBLER, D. W.; BURT, D. N.; LEE, L, Jr.: «Purchasing and Materials Management: Test and Cases». McGraw-Hill, 1990.

ERLENKOTER, D.: «Ford Whitman Harris and the Economics Order Quantity Model», *Operations Research*, vol. 38, núm. 36, 1990.

EVERETT, E. A. Jr.; EBERT, R. J.: «Production and Operations Management. Concepts, Models and Behavior». Prentice-Hall, 1992.

LARRAÑETA, J. C.; ONIEVA, L.: «Métodos Modernos de Gestión de la Producción», Alianza, 1988.

MACHUCA, J. A. D.: «Teoría de inventarios (versión provisional)», Gráficas Rublán, 1978.

MACHUCA, J. A. D.: «Planificación de las necesidades de materiales (y III)». *Alta Dirección*, núm. 121, 1985.

MACHUCA, J. A. D., DURBÁN, S., y MARTÍN, E.: «El Subsistema Productivo de la Empresa», Pirámide, 1990.

MCCLAIN, J. O.; THOMAS, L. J.; MAZZOLA, J. B.: «Operations Management. Production of Goods and Services», Prentice Hall, 1992.

PLOSSL, G.: «Production and Inventory Control», Prentice-Hall, 1985.

PORTEUS, E. L.: «Investing in Reduced Setups in the EOQ Model», *Management Science*, vol. 31, núm. 38, 1985.

PORTEUS, E. L.: «Optimal Lot Sizing, Process Quality Improvement and Setup Cost Reduction», *Operations Research*, vol. 34, núm. 1, 1986.

ROSENSHINE, M.; OBEC, D.: «Analysis of a Standing Order Inventory System with Emergency Orders», *Operations Research*, vol. 24, núm. 26, 1976.

SCHROEDER, R. G.: «Operations Management. Decision Making in the Operations Function», McGraw-Hill, 1993.

SCOTT: «Manufacturing Planning Systems», McGraw-Hill, 1994.

SILVER, E. H.; PETERSON, R.: «Decision Systems for Inventory Management and Production Planning», Wiley, 1985.

STEVENSON, W. J.: «Production/Operations Management», Irwin, 1990.

TERSINE, R. J.: «Principles of Inventory and Materials Management», Elsevier-North Holland, 1987.

VOLLMAN, T. E.; BERRY, W. L.; WHYBARK, D. C.: «Manufacturing Planning and Control Systems», Irwin, 1991.

ZANGWILL, W. I.: «From EOQ Towards ZI», *Management Science*, vol. 33, núm. 10, 1987.

APENDICE ESTADISTICO

Apéndice estadístico

Tabla A.1. Números aleatorios

42 66	59 84	76 89	78 08	94 16	38 21	51 03	99 64	20 04	37 08	**Millar 1**
13 09	43 71	50 17	51 20	63 76	53 33	57 17	18 95	88 72	18 51	
36 48	25 34	92 94	65 91	33 42	78 30	35 08	39 22	42 52	86 71	
75 34	31 16	68 21	17 19	51 93	57 93	09 78	89 09	17 74	11 98	
68 07	78 06	59 41	53 65	26 45	25 42	41 86	12 28	80 89	49 13	
54 84	26 07	04 59	78 98	41 71	15 01	66 54	06 16	04 07	74 83	
96 87	05 43	80 25	05 46	74 19	33 11	41 73	75 11	10 94	63 82	
47 88	48 82	98 33	01 27	13 30	02 48	39 49	09 21	19 69	37 49	
10 10	53 74	70 04	88 72	65 89	71 21	64 79	39 69	55 40	97 20	χ_F^2 = *10,28*
99 29	72 93	38 03	70 98	19 66	15 13	35 85	07 67	51 47	69 85	
07 99	07 12	25 73	58 50	47 77	61 53	01 21	59 81	56 96	98 90	χ_S^2 = *111,8*
90 09	55 94	56 79	05 92	79 14	62 48	26 63	61 92	25 10	59 42	
04 28	55 95	13 53	42 17	42 24	38 56	79 54	46 73	84 36	90 47	
56 98	06 37	67 58	71 51	92 47	35 44	81 83	49 94	20 98	08 86	
32 15	12 32	41 70	22 50	57 70	17 94	98 45	41 91	89 66	13 44	χ_L^2 = *5,9*
09 72	00 99	98 95	25 43	87 98	85 04	39 51	49 64	87 64	86 71	
54 47	92 26	93 86	86 80	63 99	68 51	64 72	89 26	25 31	06 94	χ_E^2 = *3,14*
80 03	92 92	53 36	36 24	73 85	09 34	75 61	30 27	51 19	91 16	
18 10	17 10	16 44	10 72	04 80	03 05	40 30	29 66	02 81	76 08	
52 46	07 54	44 85	32 42	21 46	02 25	74 21	94 52	32 45	46 55	
13 98	27 51	12 17	70 28	90 92	08 22	45 38	78 69	47 02	09 12	
71 20	83 33	28 82	34 24	31 93	34 89	95 98	68 99	19 41	91 92	
59 83	34 93	53 80	78 03	24 79	92 97	14 47	37 18	35 26	81 81	
98 11	82 71	54 71	57 91	83 64	78 15	70 69	35 00	84 47	75 02	
01 06	64 78	54 41	31 53	59 63	25 16	51 23	10 27	20 61	49 19	
75 72	99 65	89 67	66 46	91 85	85 11	89 08	75 42	71 75	38 96	**Millar 2**
00 14	24 00	88 07	82 34	77 04	74 47	88 48	92 53	13 89	97 30	
44 76	86 85	89 91	20 53	07 57	20 88	00 78	08 16	27 74	44 23	
14 99	88 08	66 58	47 76	22 09	86 64	08 08	39 07	57 08	35 83	
36 42	43 22	04 21	25 67	46 66	92 43	02 60	38 19	87 03	48 20	
26 04	06 66	44 34	96 94	81 26	90 95	47 42	16 67	29 51	55 24	
82 26	24 41	64 07	92 59	69 41	48 72	93 21	29 33	36 17	27 44	
79 12	89 40	72 12	57 49	37 06	61 40	16 69	48 40	15 20	94 89	
35 45	38 99	09 99	11 67	62 40	23 67	94 63	63 82	87 86	43 93	χ_F^2 = *14,48*
67 61	21 16	21 83	08 76	99 98	28 11	91 88	48 71	94 02	98 93	
15 72	42 89	94 80	99 46	87 44	74 48	34 62	97 97	24 22	53 54	χ_S^2 = *122,4*
92 52	40 28	05 01	13 07	75 86	11 82	26 36	55 55	29 87	39 74	
88 18	39 00	86 66	81 74	28 84	65 48	46 52	55 49	47 45	87 01	
76 27	82 47	30 03	68 05	94 39	28 60	66 39	71 24	87 03	88 99	
05 93	19 53	37 13	79 68	17 64	39 20	10 60	40 58	33 43	87 67	χ_L^2 = *12,63*
67 40	01 97	70 73	83 88	88 19	95 76	37 37	48 73	46 07	62 38	
24 15	24 55	59 79	96 41	86 81	96 83	99 53	33 13	38 22	41 58	χ_P^2 = *8,19*
72 60	55 64	88 50	76 85	88 03	91 03	13 54	33 88	17 29	06 99	
61 15	11 83	45 48	42 42	19 09	00 36	79 47	53 30	75 12	74 99	
18 63	45 45	31 64	89 91	80 51	40 04	76 01	82 11	16 38	60 19	
12 30	66 97	52 60	80 17	48 55	89 52	28 96	95 37	60 81	65 31	
30 81	08 60	43 87	46 60	13 36	62 50	30 15	28 99	63 81	36 00	
26 91	35 00	46 46	94 46	00 27	09 56	00 00	97 43	05 67	25 69	
12,78	37 30	66 72	53 96	60 52	90 00	87 85	59 20	43 85	48 79	
17 20	05 53	51 74	08 12	55 56	95 89	84 98	80 74	09 02	25 36	

Esta tabla es una reproducción parcial, tomada de J. Royo López y S. Ferrer Martín: *Tablas de Estadística*, Consejo Superior de Investigaciones Científicas, Madrid, 1955, con autorización del autor.

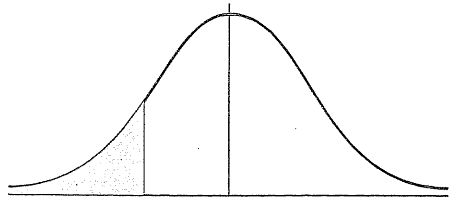


Tabla A.2. Probabilidades de $P(Z \leqslant \text{cte.})$ en la distribución normal tipificada*

Cte.	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9
−3,9	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000
−3,8	0,0001	0,0001	0,0001	0,0001	0,0001	0,0001	0,0001	0,0001	0,0001	0,0001
−3,7	0,0001	0,0001	0,0001	0,0001	0,0001	0,0001	0,0001	0,0001	0,0001	0,0001
−3,6	0,0002	0,0002	0,0001	0,0001	0,0001	0,0001	0,0001	0,0001	0,0001	0,0001
−3,5	0,0002	0,0002	0,0002	0,0002	0,0002	0,0002	0,0002	0,0002	0,0002	0,0002
−3,4	0,0003	0,0003	0,0003	0,0003	0,0003	0,0003	0,0003	0,0003	0,0003	0,0002
−3,3	0,0005	0,0005	0,0005	0,0004	0,0004	0,0004	0,0004	0,0004	0,0004	0,0003
−3,2	0,0007	0,0007	0,0006	0,0006	0,0006	0,0006	0,0006	0,0005	0,0005	0,0005
−3,1	0,0010	0,0009	0,0009	0,0009	0,0008	0,0008	0,0008	0,0008	0,0007	0,0007
−3,0	0,0013	0,0013	0,0013	0,0012	0,0012	0,0011	0,0011	0,0011	0,0010	0,0010
−2,9	0,0019	0,0018	0,0018	0,0017	0,0016	0,0016	0,0015	0,0015	0,0014	0,0014
−2,8	0,0026	0,0025	0,0024	0,0023	0,0023	0,0022	0,0021	0,0021	0,0020	0,0019
−2,7	0,0035	0,0034	0,0033	0,0032	0,0031	0,0030	0,0029	0,0028	0,0027	0,0026
−2,6	0,0047	0,0045	0,0044	0,0043	0,0041	0,0040	0,0039	0,0038	0,0037	0,0036
−2,5	0,0062	0,0060	0,0059	0,0057	0,0055	0,0054	0,0052	0,0051	0,0049	0,0048
−2,4	0,0082	0,0080	0,0078	0,0075	0,0073	0,0071	0,0069	0,0068	0,0066	0,0064
−2,3	0,0107	0,0104	0,0102	0,0099	0,0096	0,0094	0,0091	0,0089	0,0087	0,0084
−2,2	0,0139	0,0136	0,0132	0,0129	0,0125	0,0122	0,0119	0,0116	0,0113	0,0110
−2,1	0,0179	0,0174	0,0170	0,0166	0,0162	0,0158	0,0154	0,0150	0,0146	0,0143
−2,0	0,0228	0,0222	0,0217	0,0212	0,0207	0,0202	0,0197	0,0192	0,0188	0,0183
−1,9	0,0287	0,0281	0,0274	0,0268	0,0262	0,0256	0,0250	0,0244	0,0239	0,0233
−1,8	0,0359	0,0351	0,0344	0,0336	0,0329	0,0322	0,0314	0,0307	0,0301	0,0294
−1,7	0,0446	0,0436	0,0427	0,0418	0,0409	0,0401	0,0392	0,0384	0,0375	0,0367
−1,6	0,0548	0,0537	0,0526	0,0516	0,0505	0,0495	0,0485	0,0475	0,0465	0,0455
−1,5	0,0668	0,0655	0,0643	0,0630	0,0618	0,0606	0,0594	0,0582	0,0571	0,0559
−1,4	0,0808	0,0793	0,0778	0,0764	0,0749	0,0735	0,0721	0,0708	0,0694	0,0681
−1,3	0,0968	0,0951	0,0934	0,0918	0,0901	0,0885	0,0869	0,0853	0,0838	0,0823
−1,2	0,1151	0,1131	0,1112	0,1093	0,1075	0,1056	0,1038	0,1020	0,1003	0,0985
−1,1	0,1357	0,1335	0,1314	0,1292	0,1271	0,1251	0,1230	0,1210	0,1190	0,1170
−1,0	0,1587	0,1562	0,1539	0,1515	0,1492	0,1469	0,1446	0,1423	0,1401	0,1379
−0,9	0,1841	0,1814	0,1788	0,1762	0,1736	0,1711	0,1685	0,1660	0,1635	0,1611
−0,8	0,2119	0,2090	0,2061	0,2033	0,2005	0,1977	0,1949	0,1922	0,1894	0,1867
−0,7	0,2420	0,2389	0,2358	0,2327	0,2296	0,2266	0,2236	0,2206	0,2177	0,2148
−0,6	0,2743	0,2709	0,2676	0,2643	0,2611	0,2578	0,2546	0,2514	0,2483	0,2451
−0,5	0,3085	0,3050	0,3015	0,2981	0,2946	0,2912	0,2877	0,2843	0,2810	0,2776
−0,4	0,3446	0,3409	0,3372	0,3336	0,3300	0,3264	0,3228	0,3192	0,3156	0,3121
−0,3	0,3821	0,3783	0,3745	0,3707	0,3669	0,3632	0,3594	0,3557	0,3520	0,3483
−0,2	0,4207	0,4168	0,4129	0,4090	0,4052	0,4013	0,3974	0,3936	0,3897	0,3859
−0,1	0,4602	0,4562	0,4522	0,4483	0,4443	0,4404	0,4364	0,4325	0,4286	0,4247
−0,0	0,5000	0,4960	0,4920	0,4880	0,4840	0,4801	0,4761	0,4721	0,4681	0,4641

* Elaborada por el profesor D. J. Luis Pérez de los Ríos (F.C.E.E., Universidad de Sevilla).

Tabla A.2. Probabilidades de $P(Z \leqslant \text{cte.})$ en la distribución normal tipificada (*continuación*)

Cte.	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9
0,0	0,5000	0,5040	0,5080	0,5120	0,5160	0,5199	0,5239	0,5279	0,5319	0,5359
0,1	0,5398	0,5438	0,5478	0,5517	0,5557	0,5596	0,5636	0,5675	0,5714	0,5754
0,2	0,5793	0,5832	0,5871	0,5910	0,5948	0,5987	0,6026	0,6064	0,6103	0,6141
0,3	0,6179	0,6217	0,6255	0,6293	0,6331	0,6368	0,6406	0,6443	0,6480	0,6517
0,4	0,6554	0,6591	0,6628	0,6664	0,6700	0,6736	0,6772	0,6808	0,6844	0,6879
0,5	0,6915	0,6950	0,6985	0,7019	0,7054	0,7088	0,7123	0,7157	0,7190	0,7224
0,6	0,7258	0,7291	0,7324	0,7357	0,7389	0,7422	0,7454	0,7486	0,7518	0,7549
0,7	0,7580	0,7612	0,7642	0,7673	0,7704	0,7734	0,7764	0,7794	0,7823	0,7852
0,8	0,7881	0,7910	0,7939	0,7967	0,7996	0,8023	0,8051	0,8078	0,8106	0,8133
0,9	0,8159	0,8186	0,8212	0,8238	0,8264	0,8289	0,8315	0,8340	0,8365	0,8389
1,0	0,8413	0,8438	0,8461	0,8485	0,8508	0,8531	0,8554	0,8577	0,8599	0,8621
1,1	0,8643	0,8665	0,8686	0,8708	0,8729	0,8749	0,8770	0,8790	0,8810	0,8830
1,2	0,8849	0,8869	0,8888	0,8907	0,8925	0,8944	0,8962	0,8980	0,8997	0,9015
1,3	0,9032	0,9049	0,9066	0,9082	0,9099	0,9115	0,9131	0,9147	0,9162	0,9177
1,4	0,9192	0,9207	0,9222	0,9236	0,9251	0,9265	0,9279	0,9292	0,9306	0,9319
1,5	0,9332	0,9345	0,9357	0,9370	0,9382	0,9394	0,9406	0,9418	0,9429	0,9441
1,6	0,9452	0,9463	0,9474	0,9484	0,9495	0,9505	0,9515	0,9525	0,9535	0,9545
1,7	0,9554	0,9564	0,9573	0,9582	0,9591	0,9599	0,9608	0,9616	0,9625	0,9633
1,8	0,9641	0,9649	0,9656	0,9664	0,9671	0,9678	0,9686	0,9693	0,9699	0,9706
1,9	0,9713	0,9719	0,9726	0,9732	0,9738	0,9744	0,9750	0,9756	0,9761	0,9767
2,0	0,9772	0,9778	0,9783	0,9788	0,9793	0,9798	0,9803	0,9808	0,9812	0,9817
2,1	0,9821	0,9826	0,9830	0,9834	0,9838	0,9842	0,9846	0,9850	0,9854	0,9857
2,2	0,9861	0,9864	0,9868	0,9871	0,9875	0,9878	0,9881	0,9884	0,9887	0,9890
2,3	0,9893	0,9896	0,9898	0,9901	0,9904	0,9906	0,9909	0,9911	0,9913	0,9916
2,4	0,9918	0,9920	0,9922	0,9925	0,9927	0,9929	0,9931	0,9932	0,9934	0,9936
2,5	0,9938	0,9940	0,9941	0,9943	0,9945	0,9946	0,9948	0,9949	0,9951	0,9952
2,6	0,9953	0,9955	0,9956	0,9957	0,9959	0,9960	0,9961	0,9962	0,9963	0,9964
2,7	0,9965	0,9966	0,9967	0,9968	0,9969	0,9970	0,9971	0,9972	0,9973	0,9974
2,8	0,9974	0,9975	0,9976	0,9977	0,9977	0,9978	0,9979	0,9979	0,9980	0,9981
2,9	0,9981	0,9982	0,9982	0,9983	0,9984	0,9984	0,9985	0,9985	0,9986	0,9986
3,0	0,9987	0,9987	0,9987	0,9988	0,9988	0,9989	0,9989	0,9989	0,9990	0,9990
3,1	0,9990	0,9991	0,9991	0,9991	0,9992	0,9992	0,9992	0,9992	0,9993	0,9993
3,2	0,9993	0,9993	0,9994	0,9994	0,9994	0,9994	0,9994	0,9995	0,9995	0,9995
3,3	0,9995	0,9995	0,9995	0,9996	0,9996	0,9996	0,9996	0,9996	0,9996	0,9997
3,4	0,9997	0,9997	0,9997	0,9997	0,9997	0,9997	0,9997	0,9997	0,9997	0,9998
3,5	0,9998	0,9998	0,9998	0,9998	0,9998	0,9998	0,9998	0,9998	0,9998	0,9998
3,6	0,9998	0,9998	0,9999	0,9999	0,9999	0,9999	0,9999	0,9999	0,9999	0,9999
3,7	0,9999	0,9999	0,9999	0,9999	0,9999	0,9999	0,9999	0,9999	0,9999	0,9999
3,8	0,9999	0,9999	0,9999	0,9999	0,9999	0,9999	0,9999	0,9999	0,9999	0,9999
3,9	1,0000	1,0000	1,0000	1,0000	1,0000	1,0000	1,0000	1,0000	1,0000	1,0000

Tabla A.3. Valores para L_q y P_o dados λ, μ y M (para poblaciones infinitas)[1]

λ/μ	M	L_q	P_o	λ/μ	M	L_q	P_o	λ/μ	M	L_q	P_o
1,0	2	0,333	,333	....				....			
	3	0,045	,364	....				....			
	4	0,007	,367	4,4	5	5,268	,006	....			
1,1	2	0,477	,290	6	1,078	,010		7,6	8	16,039	,0002
	3	0,066	,327		7	0,337	,012		9	2,912	,0004
	4	0,011	,367		8	0,114	,012		10	1,031	,0004
1,2	2	0,675	,250		9	0,039	,012		11	0,421	,0005
	3	0,094	,294		10	0,013	,012		12	0,179	,0005
	4	0,016	,300	4,5	5	6,862	,005	7,7	8	22,636	,0001
	5	0,003	,301		6	1,265	,009		9	3,343	,0003
1,3	2	0,951	,212		7	0,391	,010		10	1,157	,0004
	3	0,130	,264		8	0,133	,011		11	0,471	,0004
	4	0,023	,271		9	0,046	,011		12	0,201	,0004
	5	0,004	,272		10	0,015	,011	7,8	8	35,898	,0001
1,4	2	1,345	,176	4,6	5	9,289	,004		9	3,856	,0002
	3	0,177	,236		6	1,487	,008		10	1,298	,0004
	4	0,032	,245		7	0,453	,009		11	0,525	,0004
	5	0,006	,246		8	0,156	,010	....			
1,5	2	1,929	,143		9	0,054	,010	....			
	3	0,237	,211		10	0,018	,010	....			
	4	0,045	,221	4,7	5	13,382	,003	....			
	5	0,009	,223		6	1,752	,007	....			
1,6	2	2,844	,111		7	0,525	,008	....			
	3	0,313	,187		8	0,181	,008	....			
....					9	0,064	,009	....			
....					10	0,022	,009	....			
....					11	0,377	,0005	....			
....					12	0,160	,0005	....			

[1] Esta tabla es una reproducción parcial de la Tabla 15.4 incluida en Stevenson (1990, páginas 755-758).

Tabla A.4. Valores para D y F, conocidos N y X (población finita)[2]

X	M	D	F	X	M	D	F	X	M	D	F
	población 5			,100	2	,054	,997		2	,117	,980
,012	1	,048	,999		1	,386	,950		1	,665	,819
,019	1	,076	,998	,105	2	,059	,997	,200	3	,028	,998
,025	1	,100	,997		1	,404	,945		2	,194	,976
,030	1	,120	,996	,110	2	,065	,996		1	,689	,801
,034	1	,135	,995		1	,421	,939	210	3	,032	,998
,036	1	,143	,994	,115	2	,071	,995		2	,211	,973
,040	1	,159	,993		1	,439	,933		1	,713	,783
,042	1	,167	,992	,120	2	,076	,995	,220	3	,036	,997
,044	1	,175	,991		1	,456	,927		2	,229	,969
,046	1	,183	,990	,125	2	,082	,994		1	,735	,765
,050	1	,198	,989		1	,473	,920	,230	3	,041	,997
,052	1	,206	,988	,130	2	,089	,933		2	,247	,965
,054	1	,214	,987		1	,89	,914		1	,756	,747
,056	2	,018	,999	,135	2	,095	,993	,240	3	,046	,996
	1	,222	,985		1	,505	,907		2	,265	,960
,058	2	,019	,999	,140	2	,102	,992		1	,775	,730
	1	,229	,984		1	,521	,900	,250	3	,052	,995
,060	2	,020	,999	,145	3	,011	,999		2	,284	,955
	1	,237	,983		2	,109	,991		1	,794	,712
,062	2	,022	,999		1	,537	,892	,260	3	,058	,994
	1	,245	,982	,150	3	0,12	,990		2	,303	,950
,064	2	,023	,999		2	,115	,990		1	,811	,695
	1	,253	,981		1	,553	,985	,270	3	,064	,994
,066	2	,024	,999	,155	3	,013	,999		2	,323	,944
	1	,260	,979		1	,568	,877		1	,827	,677
,068	2	,026	,999		2	,123	,989	,280	3	,071	,993
	1	,268	,978	,160	3	,015	,999		2	,342	,938
,070	2	,027	,999		2	,130	,988		1	,842	,664
	1	,275	,977		1	,587	,869	,290	4	,007	,999
,075	2	,031	,999	,165	3	,016	,999		3	,079	,992
	1	,294	,973		2	,137	,987		2	,362	,932
,080	2	,035	,998		1	,597	,861		1	,856	,644
	1	,313	,969	,170	3	,017	,999	....			
,085	2	,040	,998		2	,145	,985	....			
	1	,332	,965		1	,611	,853	,900	4	,656	,871
,090	2	,044	,998	,180	3	,021	,999		3	,957	,666
	1	,350	,960		2	,161	,983		2	,998	,444
,095	2	,049	,997		1	,683	,836	....			
	1	,368	,955	,190	3	,024	,998	....			

[2] Esta tabla es una reproducción parcial, adaptada de Peck y Hazelwood (1958).

INDICE